

Entwicklung von Verfahren zur rechnergestützten Verknüpfung von Bild- und Laserscandaten auf Basis von Passobjekten

Vom Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte
Dissertation

von

Dipl.-Ing. Kathrin Schilling

aus Dieburg

Referent: Prof. Dr.-Ing. Carl Gerstenecker, Technische Universität
Darmstadt

Koreferent: Prof. Dr.-Ing. Frank Boochs, Fachhochschule Mainz

Koreferent: Prof. Dr.-Ing. Andreas Eichhorn, Technische Universität
Darmstadt

Tag der Einreichung: 17.01.2012

Tag der mündlichen Prüfung: 23.03.2012

Darmstadt, 2013

D17

Kurzfassung

Aufgrund der komplementären Eigenschaften von Bild- und Scandaten werden zunehmend digitale Photogrammetrie und terrestrisches Laserscanning simultan für die Erfassung und Dokumentation dreidimensionaler Objekte verwendet. Ihre gemeinsame Nutzung erfordert die Korrespondenzherstellung zwischen den unterschiedlichen, heterogenen Datentypen und die Verknüpfung gleicher Datentypen verschiedener Aufnahmestandpunkte.

Das in dieser Arbeit entwickelte Verfahren nutzt spezielle Passobjekte, um bessere Bedingungen für eine Korrespondenzherstellung zu schaffen. Der Schwerpunkt liegt dabei in der Verknüpfung der Scandaten.

Die Eckpunkte von Würfeln werden als Passpunkte zur Bestimmung der Transformationsparameter verwendet. Die Zerlegung des Würfels in seine Einzelelemente (Ebenen, Kanten, Eckpunkte) und die Extraktion der Würfeckpunkte erfolgt mittels eines RANSAC-Algorithmus sowie der Ausgleichung und Verschneidung der Würfebenen auf Basis eines topologischen Modells. Dieses erlaubt durch seine Eindeutigkeit die Bestimmung der räumlichen Ausrichtung des Würfels.

Die Genauigkeit der berechneten Würfelgeometrie hängt in erster Linie von der Aufnahmeentfernung ab. Für eine Distanz $<10\text{m}$ werden maximale Längenabweichungen der Raum- und Flächendiagonalen der Würfel von $\pm 4\text{mm}$ erhalten. Die berechneten Werte für die Transformationsparameter bei der Verknüpfung der Scandaten sind vergleichbar mit den Resultaten bestehender Verfahren zur Registrierung von Scandaten. In Abhängigkeit von der Aufnahmekonfiguration betragen die Restklaffungen der Passpunkte bis zu 5mm . Im Gegensatz zu bestehenden Verfahren werden mit nur einem Würfel bereits gute Näherungswerte für die Transformationsparameter erhalten. Die Bestimmung der Würfeckpunkte aus den Scandaten schafft zugleich gute Voraussetzungen für eine Verknüpfung mit den Bilddaten, die unabhängig von der Position des Scannerstandpunktes aufgenommen werden können.

Abstract

Images and scans have complementary characteristics. Therefore the simultaneous use of Digital Photogrammetry and Terrestrial Laser Scanning for capturing and documenting 3D-objects has increased. However, their common use requires both the fusion of heterogeneous data from different sources and homogeneous data measured from different viewpoints.

The developed method uses particularly designed tie objects, in order to create better conditions for correspondence. The main focus is on the registration of the scan data.

The vertices of cubes are used as control points for the estimation of the registration parameters. The segmentation of the cube in its several components (planes, edges, vertices) and the extraction of the vertices are realized by a RANSAC algorithm as well as the adjustment and intersection of the planes based on a topological model. Due to the uniqueness of this model, the determination of the spatial orientation of the cube is possible.

The accuracy of the computed cube geometry depends primarily on the distance. For a distance $<10\text{m}$, the maximum deviations of the space and surface diagonals are $\pm 4\text{mm}$. The results of the values of the registration parameters are comparable to the results obtained by existing

methods. Depending on the scan configuration the residuals at the control points are $<5\text{mm}$. In contrary to existing procedures, one cube delivers already good approximate values for the transformation parameters. At the same time, the determination of the cube vertices from the scan data lays good basis to link scan data with photogrammetric images, which can be captured by an external camera, independent from the position of the scanner.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	9
2	Terrestrisches Laserscanning	11
2.1	Anwendungsgebiete, Klassifikation und Leistungsmerkmale terrestrischer Laserscanner . .	11
2.2	Messprinzip und Messgrößen terrestrischer Laserscanner	12
2.2.1	Geometrieinformation	12
2.2.2	Intensitätswert	13
2.2.3	Zusatzaspekte	14
2.2.3.1	Auflösung	14
2.2.3.2	Divergenz des Laserstrahls	15
2.3	Einflussfaktoren auf die Messgrößen	16
2.3.1	Messentfernung	16
2.3.2	Beschaffenheit der Objektoberfläche und Materialeigenschaften	18
2.3.3	Auftreffwinkel	19
2.4	Untersuchungen zur Genauigkeit von Laserscannern	20
2.5	Registrierung von Laserscandaten	22
2.5.1	Allgemein	22
2.5.2	Unterschiedliche Verfahren zur Registrierung	23
2.5.2.1	Künstliche Elemente	23
2.5.2.2	Punktwolkenbasierte Ansätze	24
2.5.2.3	Gegenüberstellung der Verfahren	25
2.5.2.4	Genauigkeitsaspekte bei der Registrierung von Scandaten	27
2.6	Weiterverarbeitung und Modellierung von Scandaten	27
3	Photogrammetrie und Bildverarbeitung	29
3.1	Photogrammetrische Verfahren	29
3.1.1	Eigenschaften von Bilddaten	29
3.1.2	Orientierung von Bilddaten	29
3.2	Verfahren der Bildverarbeitung	31
3.2.1	Allgemeines	31
3.2.2	Grundlegende Operationen	31
3.2.3	Segmentierung und Extraktion von Strukturen aus Bilddaten	32
3.2.3.1	Segmentierung von Bildinhalten	32
3.2.3.2	Extraktion von Strukturen aus Bilddaten	33
3.2.4	Bildzuordnung – Korrespondenzherstellung von Bildern	33
3.2.5	Spezielle Verfahren zur Extraktion von Strukturen aus Bilddaten und der Bildzuordnung	35
4	Gemeinsame Nutzung von Bild- und Scandaten	37
4.1	Komplementäre Eigenschaften	37
4.2	Korrespondenzherstellung von Bild- und Scandaten	38
4.2.1	Bild-Bild-Korrespondenz	38
4.2.2	Scan-Scan-Korrespondenz	39
4.2.3	Bild-Scan-Korrespondenz	39

4.3	Unterschiedliche Verfahren der gemeinsamen Datennutzung	40
4.4	Aufnahmekonfiguration	42
4.5	Existierende Ansätze zur Datenfusion	44
4.5.1	Überblick	44
4.5.2	Zusammenfassung und Beurteilung der Verfahren	47
5	Einsatz und Gestaltung von neu entwickelten Passobjekten zur Fusion von Bild- und Scandaten	49
5.1	Vorüberlegungen zur Abstimmung auf Scan- und Bilddaten	49
5.1.1	Scandaten	49
5.1.2	Bilddaten	49
5.2	Modellierung der Passkörper	50
5.3	Prototyp	52
5.3.1	Aufbau des Prototypen	52
5.3.2	Prüfung der Würfelgeometrie	53
6	Würfelkonzeption	55
6.1	Topologisches Würfelmodell	55
6.1.1	Einzelkomponenten des Würfels und ihre Codierungen	55
6.1.1.1	Ebenencodierung	55
6.1.1.2	Kanten- und Eckpunktcodierung	56
6.1.2	Möglichkeiten der Ebenenanordnung	57
6.2	Geometrische Modellierung	60
6.2.1	Modellierung der Ebenen	60
6.2.2	Modellierung der Kanten	62
6.2.3	Modellierung der Eckpunkte	62
6.3	Fehlerbudget	64
6.3.1	Bestimmung der Varianzen der Eckpunkte	64
6.3.2	Bestimmung der Eckpunktgenauigkeit bei unterschiedlichen Fertigungstoleranzen .	67
6.3.3	Kontrollberechnungen	71
7	Scandatenverarbeitung zur Realisierung des Lösungsansatzes	75
7.1	Allgemeiner Überblick	75
7.2	Würfelextraktion	76
7.3	Berechnung der Würfelemente	79
7.3.1	Ebenensegmentierung mittels RANSAC-Algorithmus	79
7.3.2	Berechnung der Ebenenparameter durch Ebenenausgleichung	81
7.3.3	Näherungskoordinaten der Eckpunkte	86
7.3.4	Segmentierung der Ebenen in ihre Teilflächen	87
7.3.5	Analyse der Intensitätswerte der Teilflächen	88
7.3.5.1	Zielsetzung	88
7.3.5.2	Ermittlung der helleren Teilflächen und ihrer Ebenenparameter	88
7.3.5.3	Signifikanztest	95
7.4	Ermittlung der Ebenencodierung	96
7.4.1	Allgemein	96
7.4.2	Bestimmung der Ebenencodierung durch Intensitätswertanalyse	97

7.4.2.1	Heller-dunkler-Relation	97
7.4.2.2	Erweiterte Analyse der Intensitätswerte	99
7.4.2.3	Codierung der Eckpunkte	101
7.4.3	Ergebnisse	101
7.5	Registrierung der Scandaten	104
8	Praktische Untersuchungen	107
8.1	Einflussfaktoren auf die Genauigkeit der Würfeckpunktbestimmung	107
8.1.1	Auflösungsstufe und Entfernung	107
8.1.2	Ausrichtung des Würfels zum Scanner	108
8.1.3	Beurteilung der Würfelgenauigkeit	112
8.2	Registrierung der Scandaten mit Hilfe der Würfel	113
8.2.1	Allgemein	113
8.2.2	Berechnungsbeispiele	113
8.2.2.1	Berechnungsbeispiel I: Berechnung der Transformationsparameter mit unterschiedlicher Würfelanzahl und Vergleich der Registrierverfahren	113
8.2.2.2	Berechnungsbeispiel II: Abweichungen zur Sollgeometrie nach Transformation	117
8.2.3	Weitere Analysen	123
8.2.3.1	Transformationsparameter mit vier Würfeckpunkten pro Würfel	123
8.2.3.2	Transformationsparameter gegenüberliegender Standpunkte	125
8.2.3.3	Bodenfläche als Ersatzebene	126
9	Auswertung der Bilddaten und ihre Verknüpfung mit den Scandaten	129
9.1	Auswertung der Bilddaten	129
9.2	Bestimmung der Würfeckpunkte im Bild	129
9.3	Gemeinsame Verwendung von Bild- und Scandaten	132
10	Zusammenfassung und Ausblick	135
10.1	Einordnung des Verfahrens	135
10.2	Aspekte der Praktikabilität	135
10.3	Verbesserungen bei der Umsetzung des Lösungsansatzes	136
	Abbildungsverzeichnis	139
	Tabellenverzeichnis	143
	Symbole und Abkürzungen	145
	Literaturverzeichnis	147
	Anhang	159
A	Topologie – Ebenencodierungen nach heller-dunkler-Relation	159
B	Helmert-Transformation	164

C	Residuen der dunkleren Teilflächen	166
D	Signifikanztest	167
E	Berechnungsbeispiele zur Kontrolle der Würfelgeometrie	169

1 Einleitung

Für die Erfassung, Modellierung und Interpretation dreidimensionaler Objekte sind geometrische und visuelle Informationen, wie Farben und Texturen, von zentraler Bedeutung. Zur Datenerfassung bieten sich damit Laserscanning und digitale Photogrammetrie an. Sie liefern Scan- und Bilddaten mit unterschiedlichen charakteristischen Eigenschaften.

Die Analyse dieser Eigenschaften zeigt, dass sich beide Datentypen komplementär ergänzen ([AGL07], [JSF⁺04], [KTMG02], [Ker03]). Sollen Objekte dokumentiert werden, empfiehlt es sich daher, beide Erfassungstechniken simultan zur Aufnahme eines Objektes zu benutzen. Gelingt es, die komplementären Eigenschaften von Bild- und Scandaten sinnvoll zu kombinieren, indem die Stärken der beiden Messverfahren genutzt werden, und ihre verschiedenartigen Informationen zu verknüpfen, kann die Datengrundlage für das zu dokumentierende Objekt erweitert und verbessert werden. [SW06] spricht von einem „anspruchsvolleren Produkt“, das bei der Kombination von terrestrischem Laserscanning mit digitalen Bildern entsteht. [Prz05] sieht den Nutzen einer kombinierten Auswertung von Bild- und Scandaten im Ausgleich systemisch bedingter Nachteile der einen Technologie durch die Vorteile der zweiten, wodurch das Gesamtsystem an Leistungsfähigkeit gewinnt.

Nach [Luh10a] sorgt die Kombination laserbasierter Messverfahren mit bildgebenden Aufnahme- und Auswertemethoden für eine Erweiterung ihres Nutzungspotentials. Ein Modell, das über Informationen beider Datentypen verfügt, verspricht eine verbesserte Interpretationsgrundlage, die sich durch eine vollständigere oder genauere geometrische Repräsentation eines Objektes und/oder durch eine höhere visuelle Attraktivität (z.B. durch Texturen) zeigt [Rön07].

Um Bild- und Scandaten gemeinsam nutzen zu können, muss die Korrespondenzherstellung zwischen den unterschiedlichen, heterogenen Datentypen und die Verknüpfung gleichartiger Datentypen unterschiedlicher Aufnahmestandpunkte mit Hilfe korrespondierender Elemente realisiert werden.

Die Verknüpfung gleichartiger, homogener Datentypen beruht dabei auf den Eigenheiten der Messverfahren. So müssen zwischen Bildern unterschiedlicher Standpunkte Korrespondenzen hergestellt werden, um eine 3D-Information generieren zu können, während bei Scandaten die Korrespondenzherstellung von Punktwolken unterschiedlicher Standpunkte eine vollständigere Erfassung des Aufnahmeobjektes ermöglicht. Für beide Verfahren existieren unterschiedliche Methoden. Die Verknüpfung von Scandaten unterschiedlicher Aufnahmestandpunkte stellt dabei ein umfangreiches Forschungsgebiet dar ([KSHM10], [DB06], [Als06], [AF06], [Akc03]).

Durch die Heterogenität der Bild- und Scandaten erweist sich ihre Korrespondenzherstellung als besonders schwierig. Wird eine frei geführte Kamera verwendet, die ein Höchstmaß an Flexibilität bei der Bildaufnahme ermöglicht, müssen in den Bild- und Scandaten identische Strukturen erkannt werden, die sich aufgrund der unterschiedlichen Perspektive verschieden abbilden.

Um dennoch eine – möglichst universelle – Korrespondenzherstellung von Bild- und Scandaten zu ermöglichen, sollen eigens konzipierte Passobjekte eingesetzt werden, die auf die Charakteristiken der beiden Messverfahren abgestimmt sind. Diese sollen sowohl für eine Verknüpfung der heterogenen, als auch der homogenen Datentypen verwendet werden.

Das Ziel dieser Arbeit besteht in der Verknüpfung der Scandaten mit Hilfe eines neu entwickelten Verfahrens. Durch den Einsatz spezieller Passobjekte sollen Schwächen bestehender Methoden ausgeglichen und die Voraussetzungen für die gemeinsame Verwendung von Bild- und Scandaten geschaffen werden.

Die Kap. 2 - 4 widmen sich den Messprinzipien, den charakteristischen Eigenschaften und den Verarbeitungsschritten bei der Verwendung von Scan- und Bilddaten. Während in Kap. 2 und Kap. 3 eine

weitgehend isolierte Betrachtung der beiden Messverfahren erfolgt, zeigt Kap. 4 ihre komplementären Eigenschaften und ihre gemeinsamen Einsatzmöglichkeiten.

In Kap. 5 und Kap. 6 wird der Prototyp eines geeigneten Passkörpers entwickelt. Anhand dieses Prototypen wird in Kap. 7 der neu entwickelte Lösungsansatz zur Verknüpfung von Scandaten präsentiert, bevor in Kap. 8 Untersuchungsergebnisse vorgestellt werden.

Kap. 9 widmet sich abschließend der schematischen Vorgehensweise zur Identifikation der korrespondierenden Punkte in den Bilddaten.

2 Terrestrisches Laserscanning

2.1 Anwendungsgebiete, Klassifikation und Leistungsmerkmale terrestrischer Laserscanner

Das Terrestrische Laserscanning (TLS) hat sich innerhalb der letzten zehn Jahre in einer Reihe von Anwendungsgebieten als zuverlässiges 3D-Messverfahren etabliert ([Luh10a], [IW09]). Nach [Kut07] stellen terrestrische Laserscanner eine attraktive Erweiterung der geodätischen Sensorik dar, da sie eine schnellere flächenhafte geometrische Aufnahme und Überwachung von Objekten als mit konventionellen Methoden ermöglichen.

Das Anwendungsspektrum ist groß. Laserscanner kommen derzeit in der Architektur, der Archäologie, der Bauforschung und Denkmalpflege ([Sem05]), im Verkehrswesen ([Rie06], [KH06]), bei der Bauwerksüberwachung ([Eli09]) und in der Kriminalistik ([Buc09], [Kös07]) zum Einsatz.

Je nach Art der Messaufgabe ergeben sich verschiedene Anforderungen an das Messsystem. Nach [SW06] bestimmen Kriterien wie die Punktdichte (Abstand zweier benachbarter Punkte), die Reichweite, die Genauigkeit und die Messrate (Punkte/Zeit) sowie die Größe des Messfeldes die Eignung für die jeweilige Messaufgabe.

Die sehr unterschiedlichen Anforderungen haben dazu geführt, dass sich derzeit eine Vielzahl von unterschiedlichen Scannern auf dem Markt befinden. Einen allgemeinen Überblick über Produktinformationen von terrestrischen Laserscannern sowie den Vergleich der Systeme liefert [GIM11] bzw. [GIM10].

Die Vielzahl der verfügbaren Systeme hat zu unterschiedlichen Klassifikationen geführt. [IW09] unterscheidet terrestrische Laserscanner nach ihrer Bauform und Funktionalität. [Ker03] differenziert zum einen nach unterschiedlichen Arten der Abtastung (Servomotor, Planspiegel, Spiegelpolygonen oder Prismen), zum anderen nach dem Gesichtsfeld (Field of View), d.h. dem Winkelmess- bzw. Aufnahmebereich, den ein Scanner pro Scan abdecken kann. Ebenso wie [Wöl09] unterteilt [Sta05] die Systeme nach ihrer Strahlablenkung und dem Distanzmessverfahren, nennt zudem jedoch auch weitere Kriterien wie beispielsweise Preis und Gewicht. [Gor08] nimmt ebenfalls die Klassifikation nach dem Distanzmessverfahren vor und unterscheidet zwischen polar messenden Laserscannern, die durch Verfahren der elektrooptischen Distanzmessung die Entfernung zur Objektoberfläche messen, und Laserscannern, welche die Distanz zum Messobjekt über das Triangulationsverfahren ermitteln. Die polar messenden Laserscanner verwenden zur elektrooptischen Distanzmessung entweder das Impulsmessverfahren oder das Phasenvergleichsverfahren. Beide Verfahren unterscheiden sich vor allem im maximalen Messbereich. Impulslaufzeitgeräte dominieren bei großen Distanzen, während hohe Geschwindigkeit und hohe Ortsauflösung die Stärke der Phasenvergleichssysteme sind [Wöl09]. Die Funktionsweise beider Verfahren wird unter anderem in [Sch96], [JSH08], [Ker03] ausführlich dargestellt.

Aus den vorherigen Betrachtungen wird deutlich, dass keine einheitliche Klassifikation der Laserscanner existiert und unterschiedliche Leistungsmerkmale der Scannersysteme für die jeweilige Messaufgabe von Bedeutung sind. Tab. 2.1.1 zeigt beispielhaft die wesentlichen Leistungsmerkmale des Laserscanners HDS 6000 von Leica Geosystems ([Lei10]), der bei den folgenden Untersuchungen und Auswertungen verwendet wird.

Tab. 2.1.1: Auszug der Leistungsmerkmale des Laserscanners HDS 6000 ([GIM07])

HDS 6000 Leica Geosystems	
Distanzmessverfahren	Phasenvergleichsverfahren
Wellenlänge	650 - 690nm
Maximale Reichweite	79m bei 90% und 50m bei 18% Albedo ^a
Auflösung bzw. Punktabstände	s. Tab.2.2.1
Genauigkeit der Distanzmessung bis 25m (1σ)	4mm bei 90% und 5mm bei 18% Albedo ^a
Durchmesser des Strahls beim Verlassen der Optik	3mm
Laserspotgröße in 50m Entfernung	14mm
Intensitätswertcodierung	12 bit \equiv 4096 Grauwertabstufungen
Gesichtsfeld (Field of View)	310° (vertikal) \times 360° (horizontal)
Winkelschrittweite	0.009°
Messrate	500.000 Punkte pro Sekunde

^adefiniert nach [Lei10]

2.2 Messprinzip und Messgrößen terrestrischer Laserscanner

2.2.1 Geometrieinformation

Beim terrestrischen Laserscanning handelt es sich um ein reflektorloses Messverfahren zur Streckenmessung. Ein vom Laserscanner ausgesandter Zielstrahl wird von Objekten innerhalb des Strahlenganges reflektiert und am Scanner wieder empfangen. [Wöl09] beschreibt das Messprinzip des Laserscannings folgendermaßen: „Man sende Licht in Richtung des Objektes, dessen Abstand zu bestimmen ist und messe die Zeit, die es für den Hin- und Rückweg benötigt und speichere die Abstandsinformation zusammen mit der Winkelinformation und eventuell noch einem Helligkeitswert in einer Datei.“

Durch die Ablenkung des Zielstrahls in horizontaler und vertikaler Richtung wird das Objekt in einem regelmäßigen Raster abgetastet und eine sehr große Punktmenge innerhalb eines kurzen Zeitraumes erfasst. Es sind keine reproduzierbaren Einzelpunktmessungen möglich ([JSH08]).

Zur Strahlablenkung werden unterschiedliche Verfahren angewendet ([Ker03], [Wöl09]). [Rie04] beschreibt eine Möglichkeit der Strahlablenkung nach dem „tachymetrischen Messprinzip“. Hierbei wird das instrumenteneigene polare Koordinatensystem durch eine vertikale Drehachse (Stehachse), eine horizontale Drehachse (Kippachse) sowie durch den Laserstrahl (Zielachse) realisiert. Die Strahlablenkung erfolgt durch einen sich schnell drehenden oder oszillierenden Polygonspiegel im Strahlengang des Laserstrahls in Verbindung mit einer langsamen Drehung um die vertikale Geräteachse.

In Anlehnung daran definieren [Sta97] und [Nei06] einen terrestrischen Laserscanner mit tachymetrischem Messprinzip als die Realisierung eines lokalen Koordinatensystems, dessen Orientierung im Raum grundsätzlich beliebig ist. Der Benutzer erhält Koordinaten, die aus den originären Messgrößen „Richtungen“, „Winkel“ und „Strecken“ berechnet werden und auf das scannereigene, lokale Koordinatensystem bezogen sind. Die „Richtungen“ entsprechen hierbei den Ablesungen des Horizontalkreises, die „Winkel“ den Ablesungen des Vertikalkreises am Tachymeter.

Die Drehachse muss für die Messung nicht in Zenitrichtung ausgerichtet sein. Einige Scanner, wie beispielsweise der HDS 6000, verfügen jedoch über Neigungssensoren und ermöglichen die Ausrichtung der vertikalen Drehachse in Zenitrichtung.

[Gor08] definiert das scannereigene Koordinatensystem als orthogonales Rechtssystem mit der Begründung, dass die „üblichen terrestrischen Laserscanner“ Koordinaten in einem mathematischen Rechtssystem liefern. Die Drehachsen werden als primäre und sekundäre Drehachsen bezeichnet, die der vertikalen und horizontalen Drehachse, definiert nach [Rie04], entsprechen (Abb. 2.2.1).

Aus den originär erfassten zwei Winkeln φ und θ sowie der Strecke r lassen sich die kartesischen Koordinaten (X, Y, Z) demnach gemäß (2.2.1) darstellen.

$$P = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = r \begin{pmatrix} \cos \varphi \sin \theta \\ \sin \varphi \sin \theta \\ \cos \theta \end{pmatrix} \quad (2.2.1)$$

Die erfassten Punkte liegen direkt als 3D-Koordinaten im lokalen Bezugssystem des Scanners vor. Durch scannerinterne Software werden bei der Umrechnung in 3D-Koordinaten an die ursprünglichen Messwerte (r, φ, θ) Korrekturen angebracht, die für den Benutzer nicht mehr ersichtlich sind und damit keine Aussage über die Qualität der Koordinaten erlauben ([Böh05a]) (vgl. Kap 2.4).

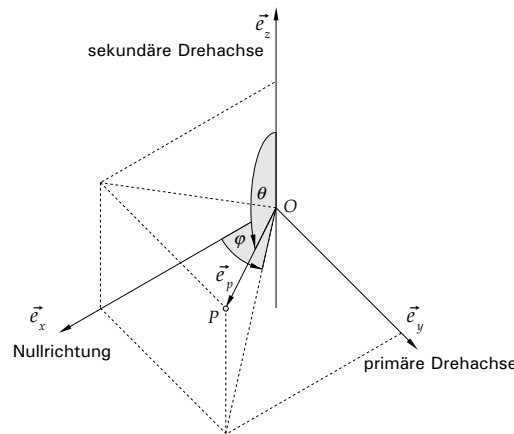


Abb. 2.2.1: Instrumentensystem eines Laserscanners definiert durch die primäre und sekundäre Drehachse ([Gor08])

Die sich derzeit am Markt befindlichen Scanner können je nach Typ und verwendeten Geräteeinstellungen bis zu einer Million Punkte pro Sekunde (Leica Geosystems HDS 7000 ([Lei11a])) erfassen.

2.2.2 Intensitätswert

Neben der Geometrieinformation liefern terrestrische Laserscanner für jeden erfassten Punkt einen Intensitätswert. Dieser beziffert die von der Objektoberfläche reflektierte Energie des Laserstrahls, die am Scanner wieder empfangen wird.

Der physikalische Mechanismus der Lichtreflexion lässt sich als Absorption und Abstrahlung des Lichts durch die Atome des reflektierenden Mediums erklären ([Tip00]). Die Reflexion an einer glatten Oberfläche entspricht einer regulären oder Spiegelreflexion. Die diffuse Reflexion entsteht dadurch, dass wegen der rauen Oberfläche reflektierende Strahlen von verschiedenen Punkten mit unterschiedlichen Winkeln ins Auge fallen ([Tip00]).

Bei einfachen Reflexionsmodellen wird die Oberfläche als ideal diffus (Abb. 2.2.2 (b)) oder ideal spiegelnd (Abb. 2.2.2 (a)) angenommen, wobei die ideal diffus reflektierende Oberfläche auch als Lambert'sche

Oberfläche bezeichnet wird ([Jut07]). Reale Oberflächen stellen eine Mischung aus beiden Eigenschaften dar. Sie sind weder ideal diffus noch ideal spiegelnd (Abb. 2.2.2 (c)).

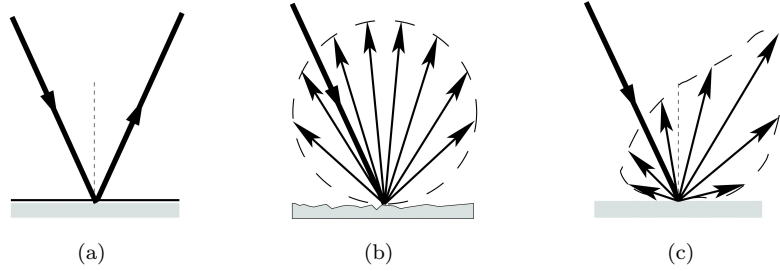


Abb. 2.2.2: Arten der Reflexion ([Ker03]) – (a) – spiegelnde Reflexion – (b) diffuse Reflexion – (c) diffuse Reflexion mit Spiegelung

[JSH08] beschreibt die spektrale Reflektanz als Verhältnis zwischen empfangener und abgestrahlter Lichtleistung in Abhängigkeit von der Wellenlänge des Laserlichtes und der Farbe des Objektes. Gemäß [Stö00] lässt sich der spektrale Reflexionsgrad $\phi(\lambda)$ als Verhältnis des gesamten reflektierten Strahlungsflusses Φ_r zum einfallenden Strahlungsfluss Φ_e definieren, wobei λ die Wellenlänge der Strahlung repräsentiert.

$$\phi(\lambda) = \frac{\Phi_r(\lambda)}{\Phi_e(\lambda)} \quad (2.2.2)$$

Der Reflexionsgrad hängt stark vom Material und dessen Oberflächenbeschaffenheit ab. Dunkle Flächen absorbieren den größten Teil des Signals und reflektieren nur einen geringen Anteil. Für schwarzes Papier beträgt der Reflexionsgrad beispielsweise 0.05 – d.h. es besitzt eine sehr geringe Reflektanz – für Schnee hingegen 0.93.

2.2.3 Zusatzaspekte

2.2.3.1 Auflösung

Die dem Messprinzip zugrunde liegende flächenhafte Erfassung bedingt, dass sich keine diskreten, frei gewählten Punkte direkt bestimmen lassen. Die Oberfläche wird vielmehr gemäß einer gewählten Winkelschrittweite in einem Raster erfasst.

Bei einer festgelegten konstanten Winkelschrittweite werden Objekte gleicher Größe mit zunehmender Entfernung mit einer geringeren Punktzahl dargestellt. Ebenso verringert sich die Punktzahl bei einem größeren Scanraster, d.h. bei einer geringeren Auflösungsstufe. Der Punktabstand zweier benachbarter Punkte steigt linear mit der Entfernung.

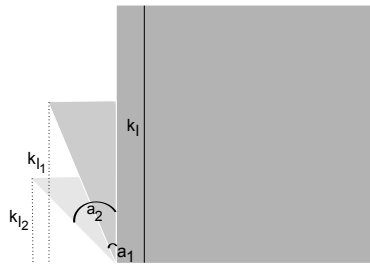
Tab. 2.2.1 zeigt die theoretischen Punktabstände des Laserscanners HDS 6000 bei den vier wählbaren Auflösungsstufen (ultra-high, highest, high, middle) sowie unterschiedlichen Entfernungen unter der Annahme, dass die Flächennormale des Objektes und die Beobachtungsrichtung des Laserscanners den Auftreffwinkel $\alpha = 0^\circ$ bilden (vgl. Kap. 2.3.3).

Für die Angabe der erfassbaren Punktzahl auf der Oberfläche ist die Ausrichtung des Objektes zum Scanner zu berücksichtigen. Eine senkrecht zum Laserstrahl ausgerichtete Ebene liefert die größte Punktzahl. Für eine ebene Platte mit der Kantenlänge $k_l = 100\text{mm}$ in 5m Entfernung ergeben sich gemäß der obigen Tabelle bei der Auflösung ultra-high (0.009°) etwa 15600 Punkte.

Tab. 2.2.1: Auflösungsstufen des HDS 6000 ([Lei10])

Entfernung [m]	Punktabstände bei unterschiedlichen Auflösungsstufen [mm]			
	ultra-high (0.009°)	highest (0.018°)	high (0.036°)	middle (0.072°)
1	0.2	0.3	0.6	1.3
3	0.5	0.9	1.9	3.8
5	0.8	1.6	3.1	6.3
7	1.1	2.2	4.4	8.8
10	1.6	3.1	6.3	12.6
13	2.0	4.1	8.2	16.3
25	3.9	7.9	15.7	31.4

Wird diese Platte in Bezug zur Aufnahme­richtung verkippt oder verdreht, reduziert sich die Anzahl der erfassbaren Punkte auf der Oberfläche der Platte. Durch eine Verkip­pung um den Winkel a_1 bzw. a_2 in Aufnahme­richtung nach hinten reduziert sich die Kantenlänge k_l in vertikaler Richtung zu den theoretischen Kantenlängen k_{l_1} und k_{l_2} (Abb. 2.2.3).



$$\begin{aligned}
 k_{l_1} &= \cos a_1 \cdot k_l \\
 k_{l_2} &= \cos a_2 \cdot k_l
 \end{aligned}
 \quad (2.2.3)$$

Abb. 2.2.3: Einfluss der Objektausrichtung auf die Punktzahl

Es ergeben sich für $k_l = 100\text{mm}$ sowie $a_1 = 30^\circ$ bzw. $a_2 = 70^\circ$ die Werte $k_{l_1} = 87\text{mm}$ und $k_{l_2} = 34\text{mm}$. Gemäß des obigen Beispiels reduziert sich bei 5m Entfernung und der Auflösung von 0.009° die Punktzahl auf etwa 13600 bzw. 5300 Punkte.

2.2.3.2 Divergenz des Laserstrahls

Die Größe eines Messpunktes wird durch den Durchmesser des Laserflecks auf dem Zielobjekt – auch als „Footprint“ oder „Laserspot“ bezeichnet – bestimmt. Da der Kollimierbarkeit des Strahls physikalische Grenzen gesetzt sind ([Wöl09]), ergibt sich ein entfernungs- und schnittabhängiger Laserspot ([JSH08]). Die Kollimierbarkeit des Strahls hängt von der Laserwellenlänge λ und vom Durchmesser D_0 des Strahls beim Verlassen der Optik ab. Nach [Wöl09] lässt sich der Durchmesser D des Laserflecks im Abstand z mit folgender Formel näherungsweise bestimmen:

$$D(z) = D_0 \sqrt{1 + \left(\frac{4 \cdot \lambda \cdot z}{\pi \cdot D_0^2} \right)^2} \approx D_0 + \frac{4 \cdot \lambda}{\pi \cdot D_0} \cdot z \quad (2.2.4)$$

Gemäß (2.2.4) hat sich nach 15m ein Laserstrahl mit einer Wellenlänge $\lambda = 660\text{nm}$ und einem Durchmesser des Strahls beim Verlassen der Optik $D_0 = 3\text{mm}$ auf ca. 7mm aufgeweitet. In 50m Entfernung entspricht dies einer Laserspotgröße von ca. 14mm (vgl. Tab. 2.1.1).

Je kleiner der Laserspot, desto kleiner der Rauschanteil bedingt durch den Footprint ([SS05]). Ein größerer Laserspot verursacht hingegen eine Verringerung der Signalstärke, die in Richtung des einfallenden Strahls reflektiert wird, und eine Vergrößerung des Rauschanteils. Das Messrauschen in Abhängigkeit von der Entfernung lässt sich auch aus den technischen Spezifikationen einiger Laserscannerhersteller entnehmen, z.B. [Zol11a].

Die Divergenz des Laserstrahls sollte bei der Wahl der Auflösungsstufe beachtet werden. Die Winkelabtastung sollte mindestens so groß gewählt werden wie die Strahldivergenz ([Ker03]). Wird eine Winkelabtastung kleiner als die Strahldivergenz gewählt, sind die Messungen stark korreliert und besitzen den gleichen Informationsgehalt ([Ker03]). Die Divergenz des Laserstrahls kann vor allem an Kanten zu Problemen führen (Kap. 2.3.1). Abb. 2.2.4 zeigt dies exemplarisch.

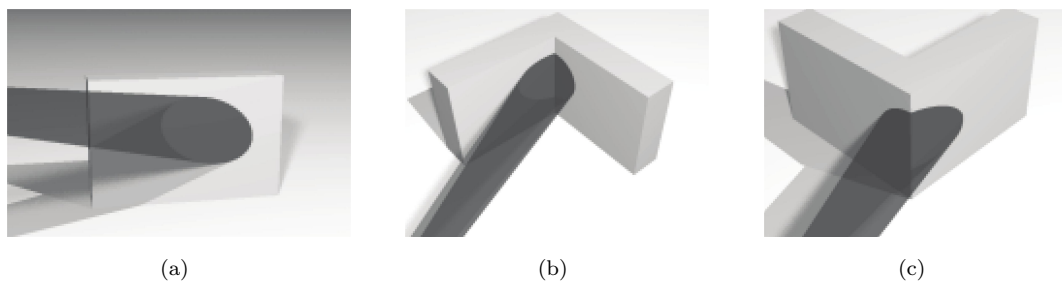


Abb. 2.2.4: Ausprägung der Reflexionsfläche im Zusammenhang mit der Strahldivergenz ([Ker03]) –
(a) Schräge Reflexionsfläche – (b) Konkave Kante – (c) Konvexe Kante

2.3 Einflussfaktoren auf die Messgrößen

Auf die Messgrößen (Strecken, Winkel und Intensitätswerte) wirken verschiedene Einflussfaktoren, die im Folgenden erläutert werden.

Nach [Wöl09] ist für den Messbereich, die Messunsicherheit und die Messrate die optische Leistung, die auf den Detektor trifft, entscheidend. Diese wird im Wesentlichen von der Entfernung des Objekts zum Scanner, der Oberflächenreflektivität bzw. den Materialeigenschaften und dem Auftreffwinkel, d.h. der Ausrichtung der Flächennormalen des Objektes gegenüber der Messrichtung, bestimmt ([Böh05a], [SI04], [JSH08]).

2.3.1 Messentfernung

Mit zunehmender Messentfernung sorgt die unvermeidliche Divergenz des Laserstrahls (vgl. Kap. 2.2.3.2) dafür, dass sich der Durchmesser des Laserstrahls vergrößert. Je weiter das Objekt entfernt ist, desto größer der Durchmesser des Laserspots auf dem Objekt.

Nach [Jut07] bewirken unterschiedlich weit entfernte Objektbereiche innerhalb des Strahlenganges in Abhängigkeit von den beleuchteten Objektbereichen unterschiedliche Entfernungswerte. Abb. 2.3.1 soll dies anhand unterschiedlicher Aufnahmesituationen verdeutlichen.

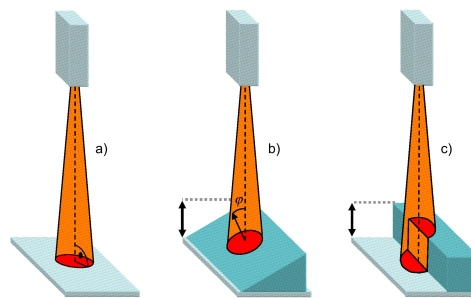


Abb. 2.3.1: Einfluss der Oberflächenform auf die Signalform ([Jut07])

- a) Bei der Beleuchtung einer horizontalen, ebenen Oberfläche von oben durch einen Laserstrahl zeigt sich, dass die empfangene Signalform des zurückgestreuten Laserpulses identisch mit der ausgesendeten Signalform des emittierten Laserpulses ist.
- b) Eine relativ zur Ausbreitungsrichtung des Laserstrahls geneigte Ebene verfügt hingegen über unterschiedliche Entfernungen innerhalb des Strahlenganges. Sie umfassen ein gewisses Entfernungsintervall, das von der Größe des Strahldurchmessers auf der Oberfläche und der Orientierung der Oberfläche relativ zum Scanner abhängig ist. Die ermittelte Entfernungsinformation ist daher mit einer höheren Messunsicherheit behaftet.
- c) Werden zwei Bereiche unterschiedlicher Entfernung beobachtet, kann es zu einer Deformation der empfangenen Signalform kommen, woraus sich ein Mischsignal der beiden Flächen ergibt. Nach [Böh05a] wird nur derjenige Teil des Strahls reflektiert, der auf das Objekt trifft, der andere Teil des Strahls wird nicht oder an anderen Objekten reflektiert. Dadurch entsteht eine fehlerhafte Distanzmessung. An Unstetigkeitsstellen treten solche fehlerhaften Distanzmessungen gehäuft auf und zeigen sich in der Punktwolke als sogenannte „Kometenschweife“. Ein weiterer Fehlereinfluss kommt dadurch zustande, dass der Punkt stets für die Mitte des Strahls berechnet wird, auch wenn das Objekt nur im Randbereich des Strahls getroffen wird ([Böh05a]).

Da Kanten die Grenze zwischen Objekten bilden, besitzen diese im Allgemeinen ein höheres Messrauschen. Im Extremfall erscheinen fehlerhafte (imaginäre) Zwischenpunkte in der Punktwolke, beispielhaft dargestellt in Abb. 2.3.2 (a)). Die dort zwischen dem Vorder- und Hintergrund auftauchenden Scanpunkte sind in der Realität nicht vorhanden.

Sollen Kanten aus einer Punktwolke extrahiert werden, muss ihr höheres Messrauschen entsprechende Beachtung finden. So ist bei der Extraktion von Kanten mittels Krümmungswerten, die direkt aus den gemessenen Kantenpunkten ermittelt werden, ein schlechteres Ergebnis zu erwarten, als beim Schnitt von zwei erfassten ebenen Flächen, da diese über ein geringeres Messrauschen verfügen.

Die Problematik der Kantenerfassung wird unter anderem in [Wöl09] und [Ker03] thematisiert. [Böh05a] versucht die Qualität der Kantenerfassung verschiedener Laserscanner mit einem speziellen Target zu quantifizieren.

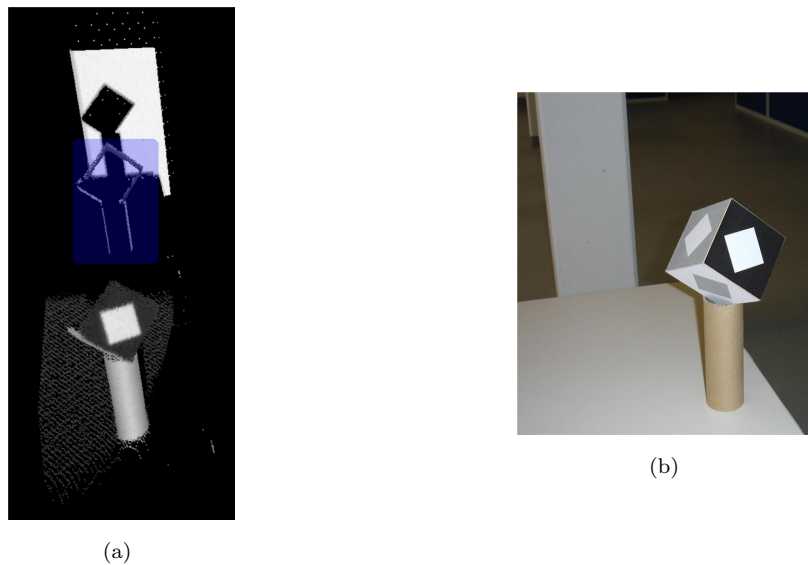


Abb. 2.3.2: Gemischtes Vorder- und Hintergrundsignal – (a) Scan – (b) Kamerabild

2.3.2 Beschaffenheit der Objektoberfläche und Materialeigenschaften

[JSH08] und [Böh05a] beschreiben den Einfluss der Beschaffenheit der Oberfläche auf die Entfernungsbestimmung, wobei die Rauigkeit und die Reflektanz der Oberfläche eine zentrale Rolle spielt.

Nach [JSH08] sorgt eine hohe Rauigkeit der Oberfläche für eine diffuse Reflexion (vgl. Kap. 2.2.2), sodass für alle denkbaren Einfallswinkel des Laserstrahls ein Signal am Scanner ankommt, was sich auf die Signalstärke und den Intensitätswert des Empfangssignals auswirkt. Die maximale Reichweite wird somit bei hoher Rauigkeit der Oberfläche geringer.

Nach [SS05] beeinflussen die Oberflächenbeschaffenheit und verschiedene Materialien die Distanzmessung in erheblichen Maße. Der Reflexionsgrad des Materials hat dabei entscheidenden Einfluss auf die Genauigkeit der Distanzmessung. Je höher der Reflexionsgrad, desto geringer das Messrauschen. Allerdings können zu starke Reflexionen – z.B. an Metallen – auch zu einer „Übersteuerung“ führen, woraus Fehlmessungen resultieren.

Das Material des Objektes beeinflusst die Eindringtiefe des Lasers. Beispielsweise dringt der Messstrahl bei Styropor in das Material ein ([SI04], [SS05], [RSK10]), sodass eine zu große Entfernung gemessen wird. An glatten Oberflächen findet hingegen oftmals eine Spiegelung anstelle einer diffusen Reflexion statt, und es wird unter Umständen gar kein zurückgesendetes Signal empfangen. Die Strecken- bzw. Tiefeninformation fehlt somit gänzlich, und es entstehen sogenannte „Löcher“ in der Punktwolke.

Im Allgemeinen stellen stark reflektierende (spiegelnde), stark absorbierende oder durchsichtige Oberflächen ungünstige Oberflächen zum Scannen dar.

Des Weiteren bestimmen die Objektfarbe und die Wellenlänge des Lasers wie stark das auftreffende Licht absorbiert wird und somit die spektrale Reflektanz, d.h. das Verhältnis zwischen empfangener und abgestrahlter Lichtleistung (vgl. Kap. 2.2.2). Bei einem hohen Absorptionsgrad gelangt weniger Signal zum Scanner zurück, was bei dunklen Oberflächen oder Flächen, die die Komplementärfarbe des verwendeten Lasers besitzen, der Fall ist. Der Einfluss von Materialfarbe und Materialart wird in [Ker03] thematisiert. Weitere Untersuchungen zum Einfluss unterschiedlicher Oberflächeneigenschaften sind in [Con04] und [VW09] zu finden.

2.3.3 Auftreffwinkel

Das Maximum der Strahlungsintensität liegt in senkrechter Richtung zur Oberfläche und nimmt mit zunehmendem Winkel zwischen der Flächennormalen und Beobachtungsrichtung mit dem Kosinus des Winkels ab ([Wöl09]).

Der Winkel zwischen der Flächennormalen \vec{n} und der Beobachtungsrichtung des Scanners bzw. des auftreffenden Laserstrahls \vec{p} soll im Folgenden als Auftreffwinkel α bezeichnet werden. Hierbei entspricht der Vektor \vec{p} dem in Abb. 2.2.1 definierten Vektor \vec{e}_p , der sich auf das lokale Scannerkoordinatensystem bezieht. Der Auftreffwinkel α lässt sich in der folgenden Weise bestimmen:

$$\cos \alpha = \frac{\vec{n} \cdot \vec{p}}{|\vec{n}| \cdot |\vec{p}|} \quad (2.3.1)$$

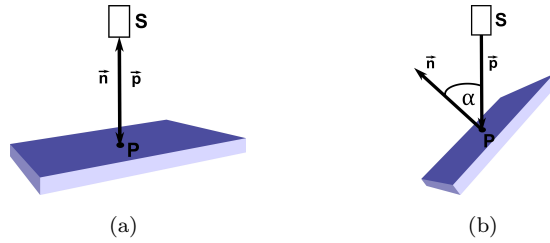


Abb. 2.3.3: Auftreffwinkel – (a) $\alpha = 0^\circ$ – (b) $\alpha = 45^\circ$

Die Abb. 2.3.3 (a) und (b) veranschaulichen schematisch zwei unterschiedliche Auftreffwinkel auf eine ebene Oberfläche. Bilden der Laserstrahl und die Flächennormale einen Auftreffwinkel $\alpha \neq 0^\circ$, nimmt der Laserspot eine elliptische Form an ([MKL08]) (vgl. Abb. 2.3.1 b und Abb. 2.2.4 a).

In Anlehnung an [JSH08] zeigt Abb. 2.3.4 den Zusammenhang von Auftreffwinkel und Divergenz des Laserstrahls. Je größer der Auftreffwinkel ($\alpha_c > \alpha_b > \alpha_a$), desto schiefender trifft der Laserstrahl auf das Objekt und desto größer der Durchmesser des Laserspots bzw. der Ellipse ($D_c > D_b > D_a$).

Der Laserspotdurchmesser D setzt sich jeweils aus einem rechten und einem linken Anteil zusammen. Während für D_a bei $\alpha_a = 0^\circ$ beide Anteile gleich groß sind ($r_a = l_a$), ergibt sich für D_c bei großem Auftreffwinkel α_c ein größerer rechter als linker Anteil ($r_c > l_c$). Dies hat Auswirkungen auf die Streckenmessung. Nach [Ker03] ziehen sich die wirksamen Intensitäten für den Teil der Reflexionsfläche, der weiter weg vom Lasergerät ist (r_c), auseinander, sodass am Photodetektor eine Intensitätsverteilung wirkt, die zu Gunsten der näheren Reflexionsteilfläche (l_c) zeitlich verschoben ist. Die Folge ist eine zu kurze Entfernungsmessung. Dieser Effekt zeigt sich umso deutlicher je größer der Auftreffwinkel und je größer die Strahldivergenz ist ([Ker03]).

Bei großem Auftreffwinkel (α_c in Abb. 2.3.4) ergibt sich die Streckenmessung hypothetisch als Mittel aus der Entfernung zum Schwerpunkt der Ellipse (S_c), der nicht auf der zentrischen Achse des Laserlichtkegels (Z_c) liegt ([Gor08]). Die am Scanner abgelesenen Winkelwerte φ und θ (vgl. Kap. 2.2.1) beziehen sich damit nicht mehr auf den Schwerpunkt S_c und die 3D-Position wird verfälscht ([MKL08]). Des Weiteren nimmt die Intensität des reflektierten Anteils des Laserstrahls mit zunehmendem Auftreffwinkel ab ([SS05]) und das Abtastintervall wächst an ($w_{ab} < w_{bc}$) ([JSH08]). Die Gefahr steigt, dass der Laserspot auf zwei räumlich hintereinander liegende Objekte auftrifft, was die Erzeugung von Kometenschweifern zur Folge hat ([SS05]).

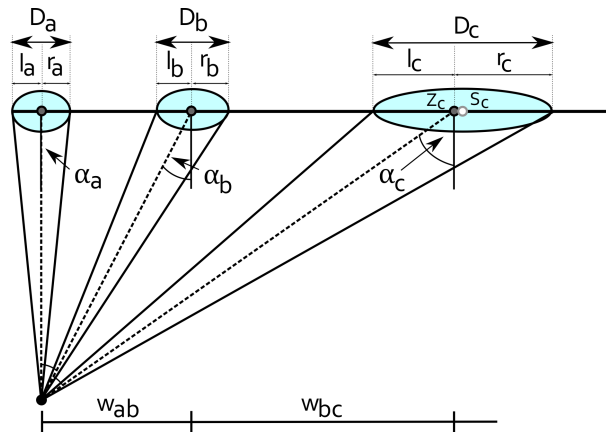


Abb. 2.3.4: Auftreffwinkel und Divergenz (vgl. [JSH08])

Untersuchungen zum Einfluss des Auftreffwinkels auf die Distanzmessung sind u.a. in [SI04], [SS05] und [MKL08] zu finden.

Der Auftreffwinkel α ist von besonderer Bedeutung, da er aufgrund der Divergenz des Laserstrahls sowohl die Streckenmessgenauigkeit als auch den Intensitätswert beeinflusst. Bei größerem Auftreffwinkel erhöht sich das Messrauschen, und der Intensitätswert wird aufgrund der geringeren Helligkeit des Laserspots abgeschwächt. Für eine Analyse der Intensitätswerte muss der Auftreffwinkel demnach berücksichtigt werden (vgl. Kap. 7.4.2.2).

2.4 Untersuchungen zur Genauigkeit von Laserscannern

Die Qualität der Koordinaten einer Laserscannermessung hängt vom Messprinzip und von der Beschaffenheit der reflektierenden Oberfläche ab ([Böh05a]). Aufgrund der direkten Anwendung scannerinterner Korrekturwerte ist eine Genauigkeitsaussage zu den bestimmten Koordinaten nur schwer möglich. Nach [Hei06] fällt es schwer, eine Vergleichbarkeit zur Leistungsfähigkeit und Genauigkeit von terrestrischen Laserscannern herzustellen. [IW09] bemängelt die Tatsache, dass keine einheitlichen Genauigkeitsspezifikationen von Scannern existieren und Hersteller als alleiniges Qualitätsmaß des Laserscanners die Angabe zur Distanzmessgenauigkeit verwenden.

Aufgrund dessen wird seit geraumer Zeit an der Entwicklung von Prüfrichtlinien gearbeitet ([Ker09], [KH08]), die eine Vergleichbarkeit durch standardisierte Testverfahren auf Basis von Normentwürfen ermöglichen sollen ([IW09]). Verschiedene Hochschulen führen geometrische Untersuchungen von Laserscannern durch, mit dem Ziel vergleichbare Aussagen über das Potential der Scanner zu treffen und daraus geeignete Prüfverfahren abzuleiten ([MKL08]). Um Scanner verschiedener Hersteller besser miteinander vergleichen zu können, sind Testparcours eingerichtet worden, u.a. am Institut für Raumbezogene Informations- und Messtechnik (i3mainz) ([Böh05a]) und am Department Geoinformatik der HafenCity Universität Hamburg ([KSMAP04], [Con04]). Ein exemplarisches Testszenario des i3mainz zur Bestimmung der Entfernungsmessgenauigkeit von Laserscannern umfasst die Berechnung der Ebenenparameter und ihrer Standardabweichungen sowie die Ermittlung der Standardabweichung der Gewichtseinheit s_0 (mittlerer Gewichtseinheitsfehler) der ausgeglichenen Ebene ([BBM03]). Hierzu wird ein spezielles Messbrett verwendet, welches über drei Teilflächen mit unterschiedlichen Grauwerten (grau, weiß und schwarz) verfügt. Es wird näherungsweise senkrecht zum Scanner positioniert und in unterschiedlichen Entfernungen gescannt (Abb. 2.4.1). Im Anschluss erfolgt die separate Ausgleichung der grauen, weißen und

schwarzen Teilfläche des Brettes.

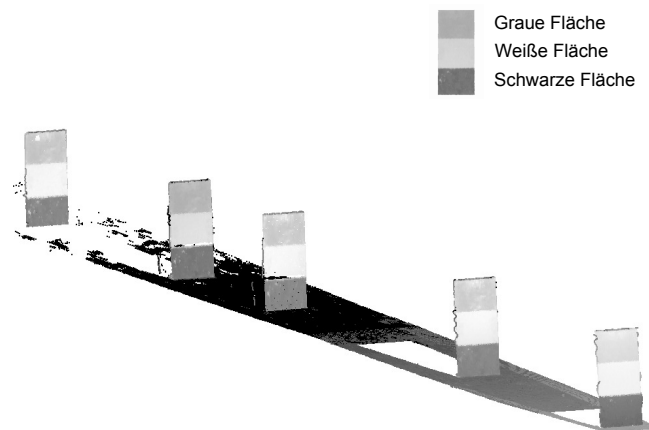


Abb. 2.4.1: Intensitätswertbasierte Darstellung der Punktwolke des Messbrettes

Die ermittelten Werte können anschließend mit den Herstellerangaben des jeweiligen Scanners sowie den Ergebnissen anderer Scanner verglichen werden. Abb. 2.4.2 zeigt exemplarisch das Ergebnis für den HDS 6000 im Entfernungsbereich bis 22m bei einfacher Messung im Innenbereich, und stellt den Bezug zu den Herstellerangaben für die Präzision der modellierten Oberfläche dar.

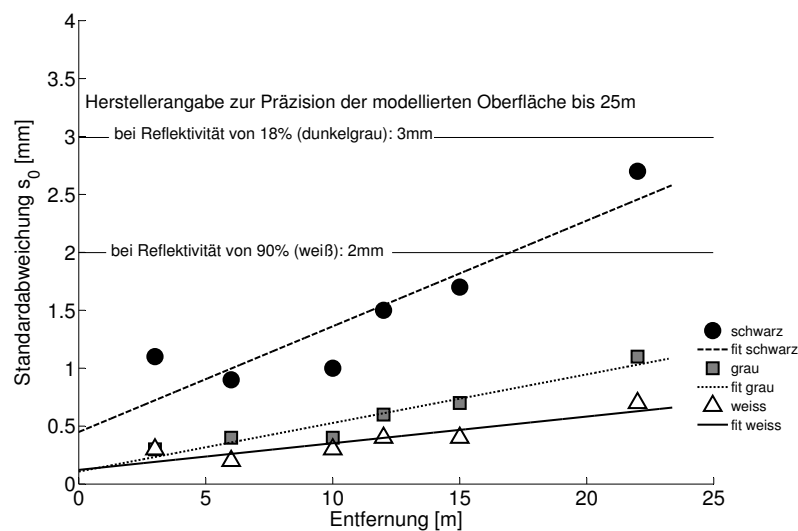


Abb. 2.4.2: Standardabweichungen s_0 der Teilflächen des Messbrettes

Die berechneten Standardabweichungen der Gewichtseinheit s_0 liegen innerhalb der Angaben des Herstellers ([Lei10]). Die Standardabweichungen für die schwarzen Teilflächen liegen höher als die der helleren Ebenen und nehmen bei größerer Entfernung deutlich zu. Die weißen und grauen Teilflächen weisen ebenfalls mit zunehmender Entfernung größere Standardabweichungen auf, allerdings zeigen sie eine wesentlich geringere Zunahme.

Die Testmessung zeigt:

- Hellere Flächen verfügen über ein geringeres Messrauschen und damit eine geringere Standardabweichung s_0 .
- Mit zunehmender Entfernung nimmt die Standardabweichung s_0 zu, was sich bei dunkleren Flächen deutlicher bemerkbar macht.
- Die maximal erreichbare Genauigkeit für die Ebenenschätzung wird maßgeblich vom Grauwert der Ebene bzw. von der Reflektivität der Oberfläche beeinflusst.

Weitere Untersuchungen des HDS 6000 sind in [VW09] zu finden.

2.5 Registrierung von Laserscandaten

2.5.1 Allgemein

Die Erfassung eines Objektes von nur einem Scannerstandpunkt aus lässt in der Regel keine vollständige Modellierung eines Objektes zu, da gewisse Bereiche des Objektes nicht sichtbar sind. Aufgrund dessen ist in den meisten Anwendungsfällen die Verwendung mehrerer Scannerstandpunkte erforderlich. Diese ermöglichen unterschiedliche Sichten auf das Objekt und damit eine vollständigere Modellierung sowie die Reduzierung von sichttoten Räumen oder Lücken in der Beschreibung des Objektes. Werden mehrere Aufnahmestandpunkte verwendet, ist die Berechnung ihrer Orientierung zueinander notwendig. Sie ist ein zentrales Element bei der Vorbereitung der Auswertung von Scandaten. Dieser Prozess wird als Registrierung bezeichnet.

Abb. 2.5.1 verdeutlicht dies beispielhaft anhand der Aufnahme einer Mauer von zwei unterschiedlichen Standpunkten. Die vorliegenden 3D-Koordinaten sind auf ihren jeweiligen Aufnahmestandpunkt bezogen und müssen im Rahmen des Orientierungsprozesses in ein gemeinsames Koordinatensystem überführt werden.

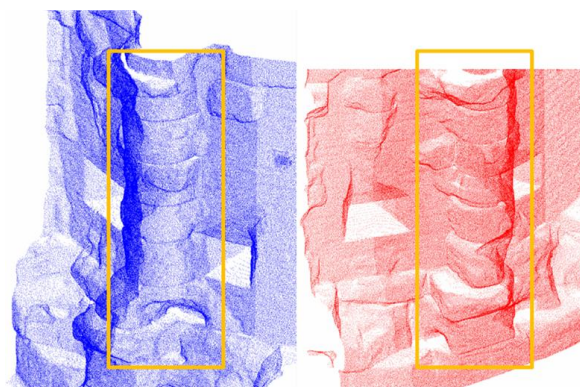


Abb. 2.5.1: Zwei Scans einer Mauer der Porta Nigra in Trier ([HS08])

Dies erfordert die Detektion korrespondierender Elemente aus den Scandatenätzen unterschiedlicher Standpunkte. Verschiedene Verfahren kommen in Betracht, die im Folgenden erläutert werden.

2.5.2 Unterschiedliche Verfahren zur Registrierung

Gemäß Kap. 2.2.1 lassen sich keine diskreten Einzelpunktmessungen des Objektes – wie beispielsweise bei einer tachymetrischen Aufnahme – durchführen. Allerdings können diskrete Punkte durch Feinscans ihres Umgebungsbereiches und deren geometrischen oder radiometrischen Auswertung geschätzt werden ([JSH08]). Dieser Sachverhalt wird bei der Registrierung von Scandaten genutzt, um korrespondierende Elemente in den Punktwolken unterschiedlicher Standpunkte zu identifizieren.

Die Verknüpfung der Standpunkte kann mit Hilfe von künstlich in die Szene eingebrachten Elementen (Zielmarken, Passkörper) – siehe z.B. [Lei11c], [Zol11b], [Far09] – oder mit natürlichen Elementen erfolgen. [LS10] unterscheidet verschiedene Arten der Registrierung:

1. „Target-basiert“.
2. Methoden des „iterative closest point (ICP)“ Algorithmus.
3. „Feature-“ bzw. merkmalsbasiert (Feature Matching).

Targetbasierte Verfahren nutzen künstlich in die Szene eingebrachte Elemente, wie beispielsweise ebene Zielmarken oder geometrische Primitive, wie z.B. Kugeln ([LS10]). Diese sollen im Folgenden als „künstliche Elemente“ bezeichnet werden (Kap. 2.5.2.1).

Die Methoden des ICP und des Feature Matchings basieren auf speziellen Algorithmen und lassen sich als punktwolkenbasierte Ansätze charakterisieren. Sie verwenden natürliche Objektpunkte bzw. -geometrien zur Korrespondenzherstellung (Kap. 2.5.2.2).

2.5.2.1 Künstliche Elemente

Nach [KSHM10] lassen sich existierende Zielmarken gemäß ihrer Informationsnutzung in zwei Gruppen einteilen. Während die eine Gruppe das Zentrum der Marke anhand der Geometrie der Punktwolke ableitet (z.B. Passkugeln), analysiert die zweite die Intensitätswerte (z.B. Retromarken).

Passkörper

Als Passkörper eignen sich geometrische Primitive wie beispielsweise Kugeln ([LS10]), die über unterschiedliche Radien verfügen können ([Far09]).

Die Kugelmittelpunkte werden anhand der Geometrie der Punktwolke abgeleitet. Verschiedene Softwarelösungen der Scannerhersteller, z.B. Leica Cyclone ([Lei11b]), nutzen den jeweiligen Radius als Zusatzinformation, um die Kugel in die Punktwolke einzupassen (Fitting).

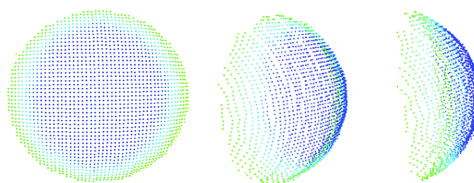


Abb. 2.5.2: Gescannte Kugel in unterschiedlichen Ansichten

Zielmarken

Als Zielmarken werden in erster Linie Black- & White-Targets oder Retromarken verwendet, die über kontrastreiche Intensitätswerte verfügen. Die Marken unterschiedlicher Hersteller (z.B. [Lei11c], [Zol11b])

unterscheiden sich in ihrem Design (Abb. 2.5.3) und sind zumeist auf einen bestimmten Scanner abgestimmt, sodass sie auch nur von diesem erkannt werden.



Abb. 2.5.3: Unterschiedliche Zielmarken – (a) Black- and White-Target (Scan und Foto) – (b) Retromarke (Foto und Scan)

Mittlerweile befinden sich auch rotierbare Zielmarken auf dem Markt. Diese werden nach [KSHM10] auf einem um das Markenzentrum kipp- und schwenkbaren Zielmarkenträger montiert und gleichen damit den Nachteil einer variierenden Silhouette – und damit der Abhängigkeit von der Zielrichtung – bei herkömmlichen Bildmarken aus. Die Zielmarken werden zwangszentriert und so ausgerichtet, dass ein geeigneter Auftreffwinkel des Laserstrahls sichergestellt ist, was zugleich einen höheren Zeitaufwand bedeutet. Die Marken erfordern einen Laserscanner, der die Intensitätswerte mit hoher Auflösung erfasst, wobei von [KSHM10] 11 bit vorgeschlagen werden. [Eli09] zeigt einige weitere Beispiele für Zielmarken und beschreibt den Einsatz einer eigens konzipierten Zielmarke für Zielweiten $>100\text{m}$.

2.5.2.2 Punktwolkenbasierte Ansätze

Die Nutzung natürlicher Objektpunkte bzw. -geometrien als Ziele basiert auf bestimmten Merkmalen und bietet gegenüber dem Einsatz von künstlichen Targets den Vorteil, dass keine zusätzlichen Elemente zur Signalisierung in die Szene eingebracht werden müssen. Hieraus resultiert ein Zeitvorteil bei der Aufnahme, und es werden keine Objektbereiche verdeckt. Aufgrund dessen wird seit einiger Zeit an der Entwicklung von punktwolkenbasierten Ansätzen gearbeitet, die eine Registrierung von Scandaten ohne spezielle Zielmarken und eine weitgehend automatisierte Lösung ermöglichen ([HP03]).

Als zweckmäßig hat sich der Iterative Closest Point (ICP) Algorithmus erwiesen, der in seiner originären Form erstmals von [BM92] vorgestellt und seitdem weiterentwickelt wurde. Details zum Verfahren sind u.a. [Har07] zu entnehmen. Einen Vergleich unterschiedlicher Verfahren des ICP stellt [RL01] vor.

Der ICP versucht die Berechnung der Transformationsparameter mit Hilfe von Punktwolkenkorrespondenzen zu lösen. Für jeden Punkt P_{iA} einer Punktwolke A wird iterativ der Punkt P_{iB} aus einer zweiten, überlappenden Punktwolke B gesucht, der den kürzesten Abstand zu P_{iA} besitzt.

Das Auffinden des nächstgelegenen Punktes stellt dabei ein komplexes Problem dar, da sich überlappende Bereiche benachbarter Scans, vor allem aufgrund unterschiedlicher Auflösung und Blickwinkel, unterschiedlich darstellen.

Da es sich beim ICP-Algorithmus um ein iteratives Verfahren handelt, werden für seine Durchführung geeignete Näherungswerte benötigt. Ausreißer und Messrauschen müssen vor dem Start des Algorithmus eliminiert werden. Zudem muss sichergestellt werden, dass der Algorithmus nicht gegen ein lokales Minimum konvergiert und somit ein verfälschtes Ergebnis liefert. Vor allem bei wenig strukturierten Oberflächen stößt der ICP damit an seine Grenzen.

Um die genannten Nachteile zu kompensieren und die Zuverlässigkeit des Ergebnisses zu verbessern, werden bei Weiterentwicklungen des ICP Zusatzinformationen über die im Scan vorkommenden Objekte berücksichtigt und identische Merkmale überlappender Punktwolken extrahiert. Eine Weiterentwicklung des ICP beschreibt beispielsweise [GLB01] mit dem Iterative Closest Compatible Point (ICCP) Algorithmus.

Da die manuelle Selektion und Extraktion diskreter, identischer Objektpunkte in den überlappenden Scans ohne Berücksichtigung der umgebenden Objektpunkte nicht möglich ist ([RHBR06], [VT04]), müssen bei den Lösungsansätzen stets mehrere Punkte betrachtet werden, die in einem merkmalsbasierten Zusammenhang stehen. Als geeignete Merkmale haben sich dabei Krümmungs- und Intensitätswerte erwiesen, da sie rotationsinvariant sind.

Eine weitere Lösungsmöglichkeit besteht in der gezielten Suche nach Regelgeometrien (z.B. Ebenen) in Scandaten. Hierbei kommen mathematische Definitionen der Regelgeometrien und/oder geometrische Zusatzbedingungen, wie beispielsweise Parallelitäts- oder Orthogonalitätsbedingungen, zum Einsatz. [BL04] stellt eine Methode vor, die auf der Nachbarschaftssuche und der Suche nach geometrischen Primitiven basiert, wobei Krümmungsänderungen und Informationen des Normalenvektors verwendet werden, um eine Korrespondenz zwischen Punktwolken herzustellen. Weitere krümmungsbasierte Ansätze zur Kantendetektion in Scandaten sind in [Als06] und [EK09] zu finden.

[EK09] führt die Registrierung in einem zweistufigen Prozess durch. Im ersten Schritt erfolgt die Suche nach Bereichen, an denen sich die Krümmung stark ändert, was auf eine Kante hinweist. Zur Klassifikation der Kantenpunkte werden Schwellwerte eingesetzt. Im Anschluss erfolgt die Berechnung von Kantenschnittpunkten, die zur Bestimmung der genäherter Transformationsparameter dienen. Diese liefern wiederum die Eingangsgrößen für einen nachfolgenden ICP-Algorithmus.

Die Extraktion von Strukturen aus Scandaten basierend auf bestimmten Merkmalen (Feature Matching) wird in einer Vielzahl von Untersuchungen thematisiert. [VGSR04] beschreibt beispielsweise die Extraktion von Kugeln. Weitere Ansätze beruhen auf der aus der Bildverarbeitung bekannten Hough-Transformation, wobei [Rab06] bzw. [Rv05] Zylinder verwenden, während [Kho07] die Extraktion komplexer Objekte mittels einer Erweiterung der generalisierten Hough-Transformation erläutert.

2.5.2.3 Gegenüberstellung der Verfahren

Bei den punktwolkenbasierten Verfahren wird das Wissen über die Struktur der Punktwolke genutzt. Sie können beim Vorhandensein geeigneter Näherungswerte und einer stark strukturierten Oberflächen gute Ergebnisse liefern. Aufgrund dessen eignen sie sich zur Feinregistrierung ([EK09]).

Ihr Nachteil besteht in einer hohen Rechenintensität, die mit der Komplexität des zu detektierenden Objektes ansteigt. Das Verfahren ist auf das Vorhandensein bestimmter Geometrien abgestimmt und somit auf einen speziellen Anwendungsfall zugeschnitten. Zudem liefert der ICP keine Information über die Genauigkeit der Transformationsparameter.

Die krümmungsbasierten Ansätze bringen zudem den Nachteil mit sich, dass sie die Kanteninformation aus den Scandaten nutzen, die jedoch mit einem hohen Messrauschen behaftet ist.

Der Vorteil künstlicher Zielmarken liegt in der Existenz von Softwarelösungen, die bereits eine (halb-) automatische Detektion der Zielmarken aus der Punktwolke erlauben. Zudem bieten sie eine Unabhängigkeit von dem zu erfassenden Objekt.

Nach [DB06] ergeben sich bei der Nutzung von Passkörpern und Zielmarken allerdings zwei wesentliche Nachteile:

- Die Marken müssen noch einmal in höherer Auflösung gescannt werden, um sie aus der Punktwolke

extrahieren und die Ermittlung der Transformationsparameter in der erforderlichen Genauigkeit vornehmen zu können.

- Oftmals ergibt sich eine eingeschränkte Verteilungsmöglichkeit der Marken, da meistens nur ein relativ kleiner Bereich des Aufnahmeobjektes, beispielsweise in Bodennähe, abgedeckt werden kann.

Zusätzlich negativ wirkt sich die Verdeckung von einzelnen Objektteilen aus.

Passkugeln müssen im Gegensatz zu Zielmarken nicht speziell ausgerichtet werden, da sich Kugeln respektive ihre Mittelpunkte unabhängig von ihrer Betrachtungsrichtung modellieren bzw. bestimmen lassen. Bei Zielmarken können hingegen Probleme bei großem Auftreffwinkel entstehen, da Intensitätswertunterschiede unter Umständen nicht mehr aufgelöst werden können.

Problematisch bei der Verwendung von Kugeln sind allerdings die sogenannten „Kometenschweife“ an den Kugelrändern, die durch Mischung mit dem Hintergrundsignal entstehen ([Gor08], [Ker08]). Des Weiteren zeigen die Kugeln oftmals weitere Unregelmäßigkeiten. [Gor08] beschreibt beispielsweise das Auftreten von Fehlmessungen bei Kugeln, die sich in geringem Abstand zum Laserscanner befinden und mit einem Auftreffwinkel $\alpha \approx 0^\circ$ (vgl. Kap. 2.3.3) erfasst werden. Diese Fehlmessungen zeigen sich in der Punktwolke als sogenannte „Kugelnasen“ (Abb. 2.5.4(b)).

Beide Effekte sorgen dafür, dass Fehlmessungen vor Schätzung des Kugelmittelpunktes zunächst manuell eliminiert werden müssen. Abb. 2.5.4(a) veranschaulicht das Ausschneiden der Kugel aus der Punktwolke. Abb. 2.5.4(c) zeigt die verbleibenden Kugelpunkte nach Entfernung der „Kugelnase“. Nach [Eli09] hängt die Genauigkeit der Schätzung von der Anzahl der gemessenen Punkte auf der Kugel und ihrem Streuverhalten ab. Werden die Kugelränder – aus den zuvor genannten Gründen – bei der Schätzung nicht berücksichtigt, verringert sich der nutzbare Kugelausschnitt.

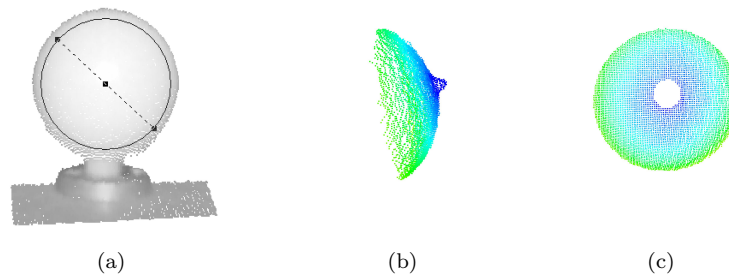


Abb. 2.5.4: Kugelextraktion aus der Punktwolke – (a) Ausschneiden der Kugel – (b) Prüfung der Kugelgeometrie (Seitenansicht zeigt verbleibende Fehlmessungen „Kugelnase“) – (c) Bereinigte Punktwolke für das Kugelfitting

Die Existenz der Vielzahl von Algorithmen zur Registrierung von Scandaten zeigt zugleich die damit verbundene Problematik. Jedes Verfahren ist mit gewissen Nachteilen verbunden, das eingesetzte Verfahren ist zumeist auf die jeweilige Aufgabenstellung zugeschnitten, und die Registrierung ist nur teilweise automatisierbar.

Der Einsatz künstlicher Elemente vereinfacht den Prozess der Scandatenregistrierung. Aufgrund der Existenz kommerzieller Softwarelösungen bei der Verwendung von Zielmarken oder Passkörpern, z.B. [Far10], [Lei11b], [Tri09], finden diese zumeist Anwendung in der Praxis.

2.5.2.4 Genauigkeitsaspekte bei der Registrierung von Scandaten

Eine allgemeingültige Genauigkeitsaussage über die Ergebnisse der Registrierung von Scandaten kann nur schwer formuliert werden. Beim Einsatz künstlicher Zielmarken oder Passkörper haben deren Verteilung und Anzahl wesentlichen Einfluss auf die Genauigkeit der Registrierung. Nach [KSHM10] zeigen „Erfahrungswerte aus verschiedenen Projekten des i3mainz, dass sechs bis acht gut verteilte Zielmarken für eine genaue und zuverlässige Referenzierung ausreichend sind“.

Des Weiteren spielt aber auch die Genauigkeit, mit der sich die Elemente extrahieren lassen, eine wesentliche Rolle. Diese unterliegt wiederum den gerätespezifischen und aufnahmebedingten Einflussgrößen, wie beispielsweise der Auflösung und dem Auftreffwinkel. Für die punktwolkenbasierten Ansätze ist die Extraktionsgenauigkeit ebenso entscheidend.

Es existieren eine Reihe von Ansätzen, die sich mit der Verbesserung der Registrierung von Scandaten auseinandersetzen. [Akc03] verwendet hierzu codierte Zielmarken. Zur Identifikation der Marken werden die Intensitätsinformationen sowie geometrische Zusatzinformationen genutzt. Die Verwendung des Verfahrens setzt gute Reflexionseigenschaften voraus.

Des Weiteren bestehen einige Ansätze, die eine verbesserte Registrierung der Scandaten durch den Einsatz von Bilddaten anstreben ([Wen07],[WH06],[DB06],[AF06],[BF07]). Der Hintergrund hierfür sind die komplementären Eigenschaften von Bild- und Scandaten, die in Kap. 4.1 thematisiert werden.

2.6 Weiterverarbeitung und Modellierung von Scandaten

Nach abgeschlossener Registrierung liegen die Daten in einem gemeinsamen Koordinatensystem vor und können weiterverarbeitet werden. Zu diesem Zweck erfolgt die Segmentierung der Punktwolke, wozu der Einsatz komplexer Algorithmen notwendig ist. Hierbei werden oftmals auf Prinzipien bereits bestehender Methoden aus der Bildverarbeitung zurückgegriffen und Methoden adaptiert, um sie für Scandaten einsetzen zu können.

Analog zu den Segmentierungsverfahren der Bildverarbeitung existieren regionen- oder kantenbasierte Verfahren, die Homogenitäten oder Diskontinuitäten des Objektes nutzen. Diese verwenden die Ähnlichkeit oder Veränderungen in den lokalen Oberflächeneigenschaften, um homogene bzw. heterogene Bereiche zu identifizieren, und führen Schwellwerte ein. Zur Klassifikation von Ebenenpunkten lässt sich beispielsweise ein Schwellwert für die zulässige Änderung der Oberflächennormalen spezifizieren.

[HN07] bezeichnet die Segmentierung von Laserscanneraufnahmen als „Unterteilung der unstrukturierten Punktwolken in sinnvolle Teilmengen mit gleichen Eigenschaften“ und beschreibt die Segmentierung von Punktwolken mittels Berechnung von Krümmungswerten und Region-Growing. Die Entscheidung, ob ein Punkt zu einem Bereich – beispielsweise zu einer Ebene – gehört oder nicht, wird dabei durch Entscheidungskriterien wie den Abstand bestimmt.

Für die Weiterverarbeitung und Modellierung der Daten können ebenfalls analytische Funktionen verwendet werden, die den Verlauf der Oberfläche approximieren. In Anlehnung an die im vorherigen Kapitel genannten Aspekte werden ebenso Regelgeometrien wie Ebenen, Kugeln und Zylinder benutzt, da sie sich relativ einfach parametrisieren lassen. Beispiele hierzu sind in [Bec05] zu finden.

Die Scannerhersteller bieten zur Weiterverarbeitung der Scandaten meist ihre eigenen Softwarelösungen an, z.B. Z+F LaserControl ([Zol09]), Leica Cyclone ([Lei11b]), FaroScene ([Far10]), Trimble RealWorks Survey ([Tri09]), 3Dipsos ([Men04]) oder RiScan Pro ([Rie10]). Ihre Vielzahl von Funktionen reicht vom Fitting geometrischer Primitive bis zur Dreiecksvermaschung ([PTVF07]), wobei zumeist die manuelle Identifikation der speziellen Geometrie (vgl. Abb. 2.5.4 (a)) oder relevanter Objektbereiche erfolgen muss. Zudem existiert spezielle Modellierungssoftware, wie z.B. Geomagic Studio und Geomagic Wrap ([Geo09])

oder PolyWorks ([Inn11]), die für die Triangulation der Punktwolke und zur Erzeugung komplexer Polygonoberflächen verwendet werden können.

Die Schritte der Weiterverarbeitung richten sich nach der Aufgabenstellung bzw. dem zu erzeugenden „Endprodukt“. In einigen Fällen kann die Segmentierung der Punktwolke nach Entfernung, Höhe oder Signalintensität ([JSH08]) ausreichend sein. In anderen Fällen ist die Aufbereitung der Messdaten sowie die Ableitung weiterer Informationen wie die Modellierung von Objekten (Vektordaten) und die Ableitung mathematischer Informationen (Volumen- und Massenberechnungen, Abstandsberechnungen, etc.) ([SI04]) erforderlich.

Weitere Beispiele für abgeleitete Produkte sind die Erstellung von Grundrißplänen durch Schnitt der Punktwolke mit Raumebenen ([Eli09]) oder von 3D-Modellen für Planungs- und Dokumentationszwecke ([BB06]), die Extraktion geometrischer Formen aus der Punktwolke ([Nie05], [Ker03]) oder die Planerstellung mittels Grundriß oder Volumenberechnung nach Dreiecksvermaschung ([SW06]).

3 Photogrammetrie und Bildverarbeitung

3.1 Photogrammetrische Verfahren

3.1.1 Eigenschaften von Bilddaten

Bilddaten verfügen über Farb- und Texturinformationen und ermöglichen dem Betrachter durch diese visuelle Charakteristik zumeist eine intuitive Interpretation. Sie liefern eine flächendeckende 2D-Information bei der Aufnahme aus einer Perspektive, wobei die Beleuchtung einen wesentlichen Einfluss auf die Bildqualität hat ([Luh10a]).

Im Gegensatz zu den Scandaten liegen die Bilddaten zunächst als zweidimensionale Information vor. Im Hinblick auf eine geometrische Verarbeitung der Daten muss diese Information im Rahmen von Orientierungsprozessen und unter Kombination von mindestens zwei Bildern in eine 3D-Information überführt werden. Hierzu kommen photogrammetrische Verfahren zum Einsatz.

Im Folgenden werden einige allgemeine Aspekte zur Orientierung von Bilddaten aufgezeigt, die im Wesentlichen auf [Luh10b] basieren.

3.1.2 Orientierung von Bilddaten

Die Grundlage für viele photogrammetrische Berechnungsverfahren bildet die zentralperspektivische Abbildung: Ein dreidimensionaler Objektpunkt P , der sich im übergeordneten Koordinatensystem (Objektkoordinatensystem) befindet und die Objektkoordinaten X, Y, Z besitzt, wird im Bild als Bildpunkt P' mit den Bildkoordinaten x', y' abgebildet.

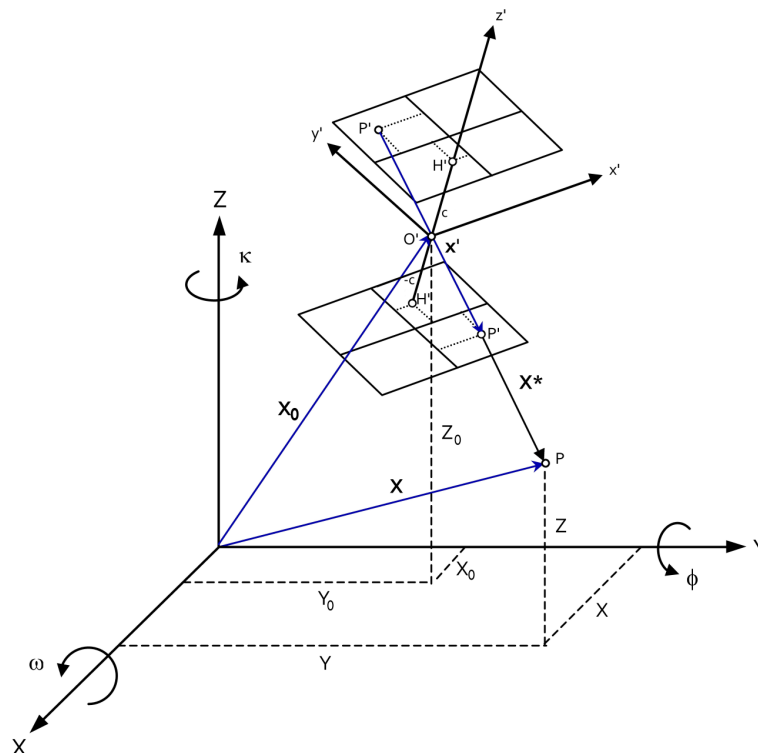


Abb. 3.1.1: Äußere Orientierung (vgl. [Luh10b], [Vog03])

Die Verbindung beider Punkte $\overline{PP'}$ erfolgt durch einen Abbildungsstrahl \mathbf{x}' (Abb. 3.1.1), der durch das Projektionszentrum der Kamera O' verläuft. Jedem Objektpunkt P kann mit Hilfe seines Abbildungsstrahls sein korrespondierender Bildpunkt P' zugeordnet werden.

Die Abbildungsstrahlen aller Objektpunkte schneiden sich im Projektionszentrum O' , dessen räumliche Lage im Bildkoordinatensystem durch die innere Orientierung festgelegt wird. Die Parameter der inneren Orientierung sind im Einzelnen:

- der Bildhauptpunkt H' mit seinen Koordinaten x_0 und y_0
- die Kamerakonstante c
- die Abbildungsfehler $\Delta x'$ und $\Delta y'$

Zur Beschreibung der Lage und Ausrichtung des Bildkoordinatensystems im Objektkoordinatensystem wird die äußere Orientierung verwendet. Die äußere Orientierung setzt sich aus sechs Parametern zusammen:

- drei Translationen (X_0, Y_0, Z_0) zur Lagebeschreibung
- drei Rotationen (ω, ϕ, κ) zur Beschreibung der Ausrichtung

Die drei Translationen lassen sich als Vektor \mathbf{X}_0 (Abb. 3.1.1), die drei Rotationswinkel ω, ϕ, κ durch die Rotationsmatrix \mathbf{R} darstellen (vgl. Anhang B). Eine ausführliche Beschreibung ist [Luh10b] zu entnehmen.

$$\mathbf{X}_0 = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} \quad (3.1.1)$$

$$\mathbf{R} = R_\omega \cdot R_\phi \cdot R_\kappa = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \quad (3.1.2)$$

Mit Kenntnis der inneren und äußeren Orientierung lässt sich der mathematische Zusammenhang zwischen den Bildkoordinaten und den Objektkoordinaten formulieren. Hierzu kommen die Kollinearitätsgleichungen zum Einsatz (3.1.3). Sie beschreiben die Transformation der Objektkoordinaten (X, Y, Z) in entsprechende Bildkoordinaten (x', y') unter Kenntnis der inneren $(x_0, y_0, c, \Delta x', \Delta y')$ und äußeren Orientierung $(X_0, Y_0, Z_0, \omega, \phi, \kappa)$.

$$\begin{aligned} x' &= x_0 - c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \Delta x' \\ y' &= y_0 - c \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \Delta y' \end{aligned} \quad (3.1.3)$$

Bei bekannter innerer und äußerer Orientierung wird jeder 3D-Objektpunkt eindeutig in einem Bildpunkt abgebildet. Ein gemessener Bildpunkt hingegen lässt keine direkte Bestimmung seines korrespondierenden Objektpunktes zu, da jeder auf dem Abbildungsstrahl liegende Objektpunkt zum selben Bildpunkt führt. Wird der Bildstrahl jedoch mit einem bekannten weiteren geometrischen Element zum Schnitt gebracht, z.B. einer Raumgeraden, lässt sich der Objektpunkt auf dem Strahl und damit seine absolute räumliche Lage im Objektkoordinatensystem festlegen.

Werden mehrere Bilder des selben Objektes aus unterschiedlichen Perspektiven aufgenommen, so lassen sich die Bilder durch den Schnitt von mindestens zwei Abbildungsstrahlen, die zu einem korrespondierenden Objektpunkt führen (homologe Bildstrahlen), verknüpfen. Es werden die Stereophotogrammetrie und die Mehrbildphotogrammetrie unterschieden. Während die Stereophotogrammetrie auf der Auswertung zweier Bilder basiert, kommen bei der Mehrbildphotogrammetrie mehrere, zumeist in einem Verbund angeordnete Bilder, zum Einsatz. Diese können im Rahmen einer Bündelblockausgleichung zu einem Gesamtmodell verknüpft werden.

Die Bündelblockausgleichung ist ein Verfahren zur simultanen rechnerischen Einpassung beliebig vieler im Raum angeordneter Bilder ([Luh10b]). Unter der Bedingung, dass sich alle korrespondierenden Bildstrahlen optimal in ihrem Objektpunkt schneiden, werden alle beobachteten Größen und alle unbekannten Parameter eines photogrammetrischen Bildverbandes in einem simultanen Berechnungsvorgang berücksichtigt. Bei einer ausreichenden Anzahl von Messungen lassen sich damit die dreidimensionalen Objektkoordinaten der Punkte sowie die äußere Orientierung für jedes beteiligte Bild und die innere Orientierung für jede beteiligte Kamera bestimmen.

Die Bestimmbarkeit des Ausgleichungssystems und die Qualität der Ergebnisse hängen wesentlich von der geometrischen Konfiguration des Systems ab ([Luh10b]). Sie wird von der Verteilung korrespondierender Bildpunkte und somit von der Strahlenschnittgeometrie bestimmt.

Für die Verknüpfung der Bilder ist demnach die Identifikation korrespondierender Verknüpfungs- oder Passpunkte notwendig. Die Grundlage dazu bildet oftmals eine in Signalen enthaltene geometrische Form ([Boo01]).

3.2 Verfahren der Bildverarbeitung

3.2.1 Allgemeines

Zur Identifikation und Extraktion von Verknüpfungspunkten werden Verfahren der Bildverarbeitung eingesetzt. Nach [Luh03] stellt die Bildverarbeitung das zentrale Element der photogrammetrischen Bildauswertung dar. Die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Photogrammetrie hängt neben der Aufnahmeanordnung (Anzahl und Position der Bilder) wesentlich von der Identifizierbarkeit und Korrespondenzanalyse der Verknüpfungspunkte ab [Luh10a].

Die Verfahren und Einsatzmöglichkeiten der Bildverarbeitung sind vielfältig. Im Folgenden werden deshalb nur einige grundlegende Operationen (Kap. 3.2.2), Verfahren zur Segmentierung und Extraktion von Strukturen aus Bildern (Kap. 3.2.3) sowie Methoden der Bildzuordnung (Kap. 3.2.4) vorgestellt. Weitere Details sind [JMNS96], [BV05], [AGD07], [HZ03], [AW09] sowie [Luh10b] zu entnehmen. In Kap. 3.2.5 werden existierende Verfahren und spezielle Algorithmen kurz erläutert.

3.2.2 Grundlegende Operationen

Operationen der Bildverarbeitung werden eingesetzt, um Bilder zu verbessern oder zu analysieren. Hierbei werden die Pixel eines Eingabe- bzw. Ausgangsbildes verändert und ein neues Ausgabe- bzw. Ergebnisbild erzeugt. [AW09] unterscheidet drei Gruppen von Operationen:

- **Punktoperationen:** Sie sind unabhängig von der Umgebung eines Pixels und bestimmen den Grau- oder Farbwert eines Pixels im Ausgabebild ausschließlich von seinem gegebenen Wert im Eingabebild. Beispiele sind die Erhöhung oder Verminderung von Helligkeit oder Kontrast.

- Lokale Operationen (Filter): Der Ausgabewert eines Pixels wird aus den Eingabewerten der Pixel in der Umgebung bestimmt. Hierbei wird eine Filtermaske zeilen- und spaltenweise über das Bild geschoben. Jedes Pixel innerhalb der Filtermaske wird mit einem Gewichtungsfaktor der Maske multipliziert. Die Addition dieser Produkte ergibt schließlich den Ausgabewert des zentralen Pixels. Die Filtermasken können sehr unterschiedliche Eigenschaften besitzen und eignen sich damit für verschiedene Aufgabenstellungen: Tiefpassfilter schwächen die hochfrequenten Bildinhalte und verringern damit das Rauschen, zugleich gehen aber auch feine Bilddetails verloren. Hochpassfilter hingegen verstärken die hochfrequenten Anteile im Bild. Beispielsweise werden Kanten verstärkt, aber auch das Rauschen nimmt zu.
- Globale Operationen: Ein Bildpunkt des Ausgabebildes ist eine Funktion aller Punkte des Eingangsbildes.

3.2.3 Segmentierung und Extraktion von Strukturen aus Bilddaten

3.2.3.1 Segmentierung von Bildinhalten

Zur Extraktion von Strukturen bzw. Verknüpfungspunkten aus Bildern ist eine Segmentierung des Bildinhaltes erforderlich. Dieser ist zumeist eine Reihe von Verarbeitungsschritten zur Bildverbesserung vorgeschaltet. Die Verbesserung digitaler Bilder erfolgt dabei im Hinblick auf gute Bedingungen für eine automatisierte Bildauswertung ([Kra04]) bzw. eine bessere Eignung für spezielle Applikationen ([Uhl05]). Die Segmentierung stellt den ersten Schritt in der Bildanalyse dar und dient der Zuordnung von Pixeln zu Segmenten. Nach [JMNS96] lassen sich für die Segmentierung von Bildinhalten Merkmale wie Intensität, Farbe, Textur, Kanten oder die Tiefeninformation nutzen. Es werden pixelorientierte, regionen- und kantenbasierte Segmentierungsverfahren unterschieden.

Bei den pixelorientierten Verfahren wird ein bestimmtes Kriterium zur Segmentierung auf jedes einzelne Pixel angewandt. Ein solches Verfahren ist das Schwellwertverfahren, wobei der Grauwert jedes Pixels mit einem festgelegten Schwellwert verglichen wird. Das Ergebnis ist ein binarisiertes Ausgabebild.

Zu den regionenbasierten Verfahren zählt beispielsweise das Region-Growing-Verfahren, das der Segmentierung zusammenhängender Bereiche ähnlicher Farbe oder Grauwerte dient ([AGD07]), oder das Watershed-Verfahren ([BL79], [Beu92], [CYP04], [Mey02]).

Die kantenbasierten Verfahren sind zahlreich. Nach [Luh10b] spielen Grauwertkanten bei der Segmentierung von Bildinhalten eine zentrale Rolle, da sie „die primären Bildstrukturen anhand derer der Mensch Objekte erkennen kann“ bilden. Kanten lassen sich als Diskontinuitäten im Verlauf der Intensitätswerte bzw. Grauwerte deuten ([Enc97]). Sie stellen somit hochfrequente Bildanteile dar, die unter Verwendung der zuvor genannten lokalen Operationen detektiert werden können. Sie bestimmen entweder das Maximum der ersten Ableitung oder den Nulldurchgang der zweiten Ableitung der Bildfunktion. Bekannte Operatoren sind beispielsweise der Prewitt-, Sobel- oder Canny-Operator ([Can86]).

Die Kantendetektoren liefern als Ergebnisbild ebenfalls ein Binärbild mit Punkten, welche die Kante repräsentieren. Neben den gesuchten Kanten im Bild wird oftmals eine Vielzahl von Punkten anderer, irrelevanter Kanten detektiert und die „interessierenden“ Kanten sind oft nicht zusammenhängend ([Fra12]). Abb. 3.2.1 zeigt beispielhaft die Anwendung des Sobeloperators auf einen Bildausschnitt.

Um Kanten aus dem Ergebnisbild zu extrahieren, muss im nächsten Schritt nach Linienobjekten bzw. Konturen gesucht werden. Hierzu eignet sich die Hough-Transformation ([Hou62], [DH71]). Mit ihr lassen sich beliebige, parametrisierbare Formen in Punktverteilungen lokalisieren (z.B. Geraden, Kreise, Ellipsen). Sie ist daher besonders geeignet zur Detektion künstlicher Objekte ([Fra12]).

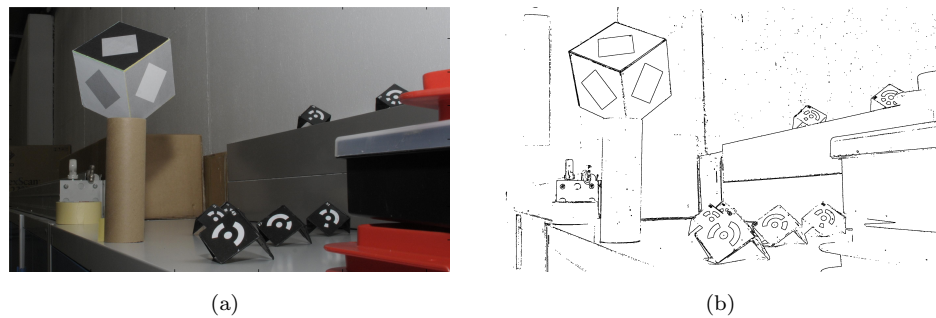


Abb. 3.2.1: Exemplarische Anwendung des Sobeloperators auf einen Bildausschnitt – (a) Bildausschnitt – (b) Binärbild nach Anwendung des Sobeloperators

3.2.3.2 Extraktion von Strukturen aus Bilddaten

Zur Extraktion von Merkmalen aus Bildern werden lokale Operatoren, sogenannte Interest-Operatoren, eingesetzt ([Wen07]). Diese sind spezielle Algorithmen, die verwendet werden, um markante Strukturen in Bildern, wie z.B. Ecken, Kanten oder Regionen, zu detektieren ([JF08]). Ihr Einsatzgebiet erstreckt sich von der Zuordnung eines Stereobildpaares (Stereo-matching) und dem Zusammenfügen von Panoramabildern (Stiching) bis zur Erkennung von Objekten in Einzelbildern und deren Verfolgung in Bildserien ([Bar12]).

Es existieren sehr viele unterschiedliche Interest-Operatoren, die auf die Charakteristiken der jeweiligen Bildmerkmale (Punkte, Linien, Regionen) abgestimmt sind.

Interest-Operatoren zur Extraktion von Punktmerkmalen (Interest-Point-Detektoren) sind beispielsweise Moravec ([Mor77]), Förstner ([FG87]), SUSAN (Smallest Univalued Segment Assimilating Nucleus) ([SB97]), Harris ([HS88]) oder FAST (Features from Accelerated Segment Test) ([RD06]). Kantenbasierte Interest-Operatoren sind die in Kap. 3.2.3.1 vorgestellten Kantenfilter, wie z.B. Canny- oder Sobeloperator.

Interest-Operatoren spielen eine zentrale Rolle für das merkmalsbasierte Matching von Bildern (vgl. Kap. 3.2.4). Eine kurze Beschreibung unterschiedlicher Operatoren ist [Wen07] zu entnehmen, eine Gegenüberstellung in [SMB00] zu finden.

3.2.4 Bildzuordnung – Korrespondenzherstellung von Bildern

Zur Erzeugung von 3D-Objektkoordinaten ist die Herstellung der Korrespondenz zwischen den Bildern erforderlich. Die Bilder müssen einander zugeordnet werden. Hierbei lassen sich einerseits Objektmerkmale wie beispielsweise Kanten, Konturen, Farben und Texturen nutzen, andererseits können Codierungen wie Strichcode oder Zielmarken verwendet werden ([JMNS96]). Um eine Lokalisation der Passpunkte zu erleichtern, wird oftmals eine Bildsignalisierung in Form codierter oder retroreflektierender Punktmarken vorgenommen. Nach [AW09] besteht das Ziel der Bildzuordnung (Matching) in der automatischen Bestimmung von einander entsprechenden, korrespondierenden Punkten in zwei oder mehr Bildern. Hierbei ist eine bildweise Verarbeitung aufgrund unterschiedlicher Perspektive, Ausschnitte und Belichtung unmöglich ([Bar12]), sodass kleine Bildbereiche analysiert werden.

Es existiert eine Vielzahl von Matching-Verfahren. [Maa97] und [Erd10] unterscheiden drei Kategorien:

1. Area-based matching (flächenbasiert).
2. Feature-based matching (merkmalsbasiert).

3. Relation-based matching (relational).

1. Die area-based (flächenbasierte) oder intensitätsbasierte Zuordnung bestimmt die Übereinstimmung zwischen zwei Bildbereichen nach der Ähnlichkeit ihrer Grauwerte (z.B. durch Korrelation) ([AGD07]). Hierbei wird die Grauwertverteilung eines kleinen Bildausschnitts, das als Referenzbild (Template) dient, mit der Grauwertverteilung in einem Suchfenster des anderen Bildes verglichen. Beispiele für das area-based matching sind die Kreuzkorrelation und das Least-Squares-Matching.

Bei der Kreuzkorrelation werden die Korrelationskoeffizienten der Grauwerte zwischen dem Template und dem Suchfenster bestimmt. Ausgehend von einer Näherungsposition wird das Suchfenster dabei über das Bild bewegt. Die gesuchte Position ist gefunden, wenn das Ähnlichkeitsmaß des Templates und des Suchfensters maximal ist. Zur Bestimmung der Näherungsposition können die Parameter der äußeren Orientierung der beiden Bilder verwendet werden.

Das Least-Squares-Matching ([Ack83]) verwendet eine iterative Kleinste-Quadrate-Ausgleichung, welche die Summe der Quadrate der Grauwertdifferenzen des Templates und des Suchfensters minimiert ([Bal12]). Es berücksichtigt Grauwertdifferenzen sowie geometrische Unterschiede. Nach [Bal12] bestehen die wesentlichen Nachteile des Verfahrens darin, dass sehr gute Näherungen (von ca. 2-4 Pixeln) notwendig sind und große geometrische oder radiometrische Unterschiede nicht kompensiert werden können.

2. Die Grundlage des feature-based (merkmalsbasierten) Matchings bildet die Übereinstimmung markanter Bildmerkmale, wie Punkte, Linien oder Flächen, die sich für eine Bild-zu-Bild-Zuordnung eignen. Diese Merkmale müssen in einem Vorverarbeitungsschritt extrahiert werden, wozu Interest-Operatoren (vgl. Kap. 3.2.3.2) zum Einsatz kommen ([Luh10b]).

Für die spätere Zuordnung der extrahierten Elemente können die Ähnlichkeit der Merkmalsattribute, wie Form, Farbe, Größe und Helligkeit signalisierter Punkte verwendet werden. Hierbei ist die Zuverlässigkeit dieser Merkmale und ihre Invarianz gegenüber Abbildungen aus unterschiedlichen Aufnahmerichtungen, mit unterschiedlichen Bildmaßstäben und eventuell unter unterschiedlichen Beleuchtungsbedingungen zu prüfen ([Maa97]).

Die Konsistenz einer mehrfachen Lösungen kann durch die Einbeziehung der lokalen Nachbarschaft überprüft und so die beste Lösung ermittelt werden ([Bal12]). Abb. 3.2.2 zeigt diesen Sachverhalt am Beispiel von Punktmerkmalen. Für Punkt 1 (Abb. 3.2.2 (a)) wird eine Matchinglösung gesucht. In Frage kommen dafür die Punkte $1'$ und $1''$ (Abb. 3.2.2 (b)), die ohne Berücksichtigung der Nachbarschaft gleich gute Lösungen repräsentieren. Erst unter Berücksichtigung der Nachbarschaft von Punkt 1 (Abb. 3.2.2 (c)) wird als eindeutige Lösung der Punkt $1'$ identifiziert (Abb. 3.2.2 (d)).

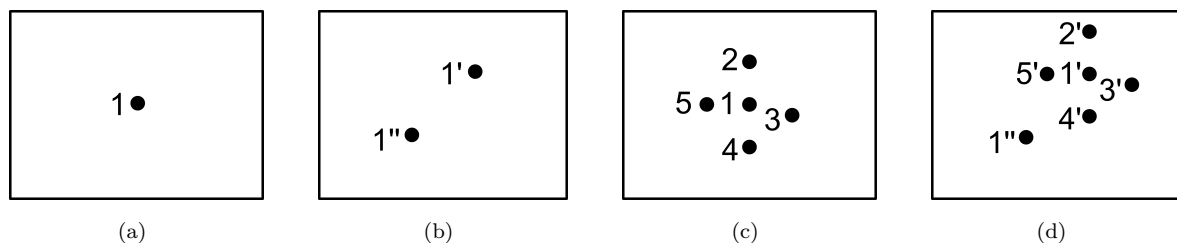


Abb. 3.2.2: Merkmalszuordnung unter Berücksichtigung der Nachbarschaft ([Bal12]) – (a) Ausgewählter Punkt 1 im Templatebild – (b) Zwei gleich gute Matchinglösungen $1'$ und $1''$ – (c) und (d) Überprüfung der Konsistenz der zwei möglichen Lösungen $1'$ und $1''$ unter Einbeziehung der Nachbarschaft. Lösung $1'$ ist konsistent mit den Lösungen der Nachbarn von Punkt 1 und wird deshalb gewählt

Anstelle von Punktmerkmalen können ebenso linienförmige Elemente verwendet werden. [Maa97] beschreibt ein solches Zuordnungsverfahren und geht auf die auftretenden Mehrdeutigkeiten bei der Zuordnung von Geradensegmenten ein.

Die merkmalsbasierten Matching-Verfahren sind zahlreich. Ihnen gemeinsam ist zunächst die Extraktion der markanten Bildstrukturen und die anschließende Zuordnung der korrespondierenden Elemente in verschiedenen Bildern.

3. Neben den flächen- und merkmalsbasierten Verfahren existiert das relation-based (relationale) Matching. Es verwendet Bildmerkmale und berücksichtigt die gegenseitigen Beziehungen zwischen Strukturen bzw. Merkmalen ([Bal12]). Details sind [VH92] zu entnehmen.

Die unterschiedlichen Matchingverfahren besitzen Vor- und Nachteile ([Bal12]): Intensitätsbasierte Verfahren sind weniger empfindlich gegenüber Rauschen und gut geeignet für stark texturierte Bilder. Bei Bildern mit schwacher Textur können hingegen Probleme auftreten, da unter Umständen geometrische Unterschiede in den Bildern nicht erkannt werden. Merkmalsbasierte Verfahren mit Punkten oder linearen Merkmalen funktionieren besser bei Oberflächendiskontinuitäten.

Nach [Bar07] besteht bei den merkmalsbasierten Verfahren das Problem, dass die extrahierten Merkmale empfindlich gegenüber Drehungen, Verschiebungen, Verzerrungen, Rauschen, Beleuchtung und Verdeckungen sind. Es werden deshalb Merkmale gesucht, die gegenüber diesen Einflussgrößen unempfindlich sind und die trotz veränderten Bedingungen bei der Bildaufnahme (z.B. veränderte Blickrichtung) in den Bildern erkannt werden.

3.2.5 Spezielle Verfahren zur Extraktion von Strukturen aus Bilddaten und der Bildzuordnung

Um Bilder mehrerer Aufnahmestandpunkte verknüpfen und ein 3D-Modell erstellen zu können, muss eine Beziehung zwischen den Einzelbildern mit Hilfe von korrespondierenden Elementen oder Strukturen, wie beispielsweise Punkten oder Linien, hergestellt werden. Da sich nicht alle Elemente oder Strukturen eines Bildes zur Korrespondenzherstellung eignen (z.B. Punkte in homogenen Regionen), müssen zunächst markante Strukturen – möglichst automatisiert – identifiziert werden. Zu diesem Zweck ist auf dem Gebiet der Computer Vision in den letzten Jahrzehnten eine Reihe von Interest-Point-Detektoren (vgl. Kap. 3.2.3.2) entwickelt worden.

Die Anforderungen, wie beispielsweise die Ermittlung der „wichtigen“ und das Ignorieren der „unwichtigen“ Punkte, die genaue Lokalisation und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse oder die Unempfindlichkeit gegenüber Bildstörungen und Bildveränderungen werden dabei immer besser erfüllt ([Bar12]).

Eine spezielle Methode stellt die Skaleninvariante Merkmalstransformation „SIFT“ (Scale Invariant Feature Transformation) ([Low99], [BL02], [Low04]) dar. Sie wird von [Gre05] in der folgenden Weise beschrieben: „In einem zu analysierenden Bild werden Schlüsselpunkte (SIFT-Keys) gesucht, die in anderen Aufnahmen derselben Szene mit hoher Wahrscheinlichkeit wiederfindbar sind. Zu jedem Schlüsselpunkt wird ein sogenannter Deskriptor erzeugt, der die Region um den Schlüsselpunkt beschreibt.“ Die Berechnung des Deskriptors erfolgt relativ zur Orientierung und Skalierung des Bildes, sodass homologe Schlüsselpunkte in unterschiedlichen Bildern gleiche Deskriptoren besitzen. Da diese invariant gegenüber Rotation, Translation und Skalierung sind, können sie einander zugeordnet werden. Neben der Invarianz gegenüber Bildskalierung, Translation und Rotation ist das Verfahren teilweise unempfindlich gegenüber Beleuchtungsänderungen und Verdeckungen. [MS05] stellt mit „GLOH“ (Gradient Location and Orientation Histogram) eine Erweiterung des SIFT-Deskriptors vor. [TLF10] beschreibt mit „DAISY“ einen

Deskriptor für das Bildmatching von Stereobildern mit großen Basislinien.

Anstelle von Punkten werden für das merkmalsbasierte Matching oftmals auch Linienelemente genutzt. [SZ97] beschreibt ein Verfahren zum Matching von Liniensegmenten zwischen Bildern und verwendet Grauwertinformationen sowie geometrische Beziehungen. [OWH⁺10] stellt einen Ansatz vor, der auf der paarweisen Zuordnung von Linienelementen aus Stereo-Luftbildern beruht. Das Verfahren von [WWH09] nutzt die Information der lokalen Nachbarschaft der Linien, um diese einander zuordnen zu können. [ZB00] bezieht zusätzliches Wissen über die Objekte im Bild ein, um Straßen und Fahrbahnrande in Bildern zu finden. [SV04] kombiniert Luftbilder und Daten aus einem Geographischen Informationssystem (GIS) für eine Klassifikation gefundener Linien und eine anschließende 3D-Gebäuderekonstruktion.

In [MTS⁺05] erfolgt ein Vergleich mehrerer unterschiedlicher Verfahren bzw. Detektoren. Hierbei zeigt sich, dass kein Detektor existiert, der optimal für alle Anwendungsgebiete ist. Zu diesem Ergebnis gelangt auch [JF08]. Jeder Detektor besitzt gewisse Stärken. Während ein Detektor besser geeignet ist, um homogene Regionen mit markanten Grenzen zu detektieren, werden von anderen Verdeckungen besser kompensiert. [MTS⁺05] schlägt deshalb die simultane Verwendung mehrerer Detektoren vor.

Für die Zuordnung der extrahierten Merkmale existieren spezielle Algorithmen, wie beispielsweise „SfM“ (Structure-from-Motion) ([TK92], [Fau93], [DSTT00], [HZ03]). „SfM-Algorithmen bieten die Möglichkeit mit Hilfe einer Serie sich überschneidender Bilder von (digitalen) Kameras von unterschiedlichen Standorten die Kamerapositionen und die dreidimensionale Geometrie der fotografierten Szene zu rekonstruieren“ ([Fer11]). Das daraus entstandene 3D-Bildmodell wird aufgrund seiner geringen Punktdichte als „sparse point cloud“ oder „spärliche Punktwolke“ bezeichnet (vgl. Kap. 4.5.1). In [PVV⁺04] wird ein SfM-Algorithmus zur Erstellung von texturierten 3D-Bildmodellen aus einer Sequenz von Bilddaten verwendet. Basierend auf der Verfolgung und dem Matching spezieller Merkmale wird die Beziehung zwischen einzelnen Kamerastandpunkten berechnet und ein 3D-Modell der Szene sowie die Bewegung der Kamera abgeleitet.

Derzeit existieren einige frei verfügbare Softwaresysteme, die basierend auf SfM-Algorithmen die Orientierung zwischen Bildern unterschiedlicher Aufnahmestandpunkte oder Aufnahmezeitpunkte ermöglichen. Eines dieser Programme ist Bundler ([Sna10], [SSS06], [SSS07]). Bundler wurde an der Universität Washington entwickelt und ermöglicht die Berechnung der Kamerastandpunkte sowie der 3D-Objektkoordinaten des aufgenommenen Objekts aus einer Vielzahl von ungeordneten Bildsammlungen ohne vorherige Kenntnis der Kamerakalibrierung. Die Software verwendet hierzu den zuvor genannten SIFT-Keypoint-Detektor ([Low04]) zur Merkmalsextraktion, ordnet homologe Bildpunkte einander zu und führt abschließend eine Bündelblockausgleichung, basierend auf [LA09], durch. Das Ergebnis ist eine kolorierte, spärliche Punktwolke, zu deren Verdichtung weitere Pakete zur Verfügung stehen ([Fur10], [FP10]). Weitere Details des Verfahrens sind [FP09] und [FP08] zu entnehmen.

Neben der Software Bundler stehen eine Reihe weiterer SfM-Software-Toolboxen zur Verfügung ([Zis12], [Rab12], [Est12]). [Est12] stellt mit der Toolbox „FIT3D“ für Matlab Funktionen auf Basis von SfM-Algorithmen bereit, die dem Anwender ermöglichen ein 3D-Modell aus kalibrierten Bildern zu erzeugen.

4 Gemeinsame Nutzung von Bild- und Scandaten

4.1 Komplementäre Eigenschaften

In Kap. 2 und 3 sind die wesentlichen Merkmale sowie wichtige Verarbeitungsschritte bei der alleinigen Prozessierung von Scan- und Bilddaten vorgestellt worden. Werden die strukturellen Merkmale beider Datentypen gegenübergestellt, zeigen sich ihre komplementären Eigenschaften (Tab. 4.1.1).

Tab. 4.1.1: *Komplementäre Eigenschaften von Bild- und Scandaten ([Sch11])*

	Bilddaten	Scandaten
Information	2D-Geometrien, Farben, Texturen, implizite 3D-Information	3D-Geometrien, Intensitätswert, explizite 3D-Information
Abtastauflösung	höher bei Bilddaten	
Interpretation	intuitiv	teilweise schwierig
Komplementäre Eigenschaften	3D-Geometrieinformation muss zunächst erzeugt werden, was die Identifikation korrespondierender Elemente erfordert	Geometrieinformation liegt direkt vor
	flächendeckende 2D-Information bei Aufnahme aus einer Perspektive	gegebenenfalls fehlende Informationen aufgrund von begrenzter Reichweite, mangelnder Reflexion oder geringer Auflösung bei Aufnahme aus einer Perspektive
	radiometrische Unterschiede in den Bilddaten (Beleuchtung), passiv	unabhängig von der Beleuchtung, aktiv
	höhere Genauigkeit in bestimmten Objektbereichen (z.B. an Kanten)	Ungenauigkeiten an Kanten, Messung diskreter Punkte nicht möglich, da Raster vorgegeben

Unabhängig aufgenommene Bilddaten besitzen gegenüber Scandaten eine höhere Auflösung sowie Farb- und Texturinformation. Nach [Luh10a] ist ein photographisches Bild (RGB-Bild) deutlich leichter zu interpretieren als eine 3D-Punktwolke, auch wenn diese durch die Intensität des reflektierten Laserlichts visualisiert wird. Die 3D-Information der Bilddaten liegt jedoch zunächst nur implizit vor und muss für eine geometrische Verarbeitung generiert werden.

Eine Laserscannermessung liefert direkt eine Punktwolke und beinhaltet damit eine explizite, dreidimensionale Geometrieinformation. Aufgrund einiger systemtypischer Einflüsse, wie z.B. Strahlbreite, Abtastdichte und lückenhafte Abtastung, ist eine Interpretation dieser Punktwolke für den Anwender jedoch oftmals problematisch. Nach [BB06] erschwert die fehlende Farbinformation die „bildliche“ Vorstellung des Auswerters vom Objekt, sodass allein mit der Scannerpunktwolke eine Interpretation der erfassten Szene nur sehr schwer möglich ist.

Die komplementären Eigenschaften von Bild- und Scandaten zeigen sich zumeist bei der Betrachtung von bestimmten Objektbereichen. Beispielsweise ist die Identifikation korrespondierender Elemente in Bilddaten besonders in texturarmen Gebieten problematisch, weshalb in diesen Bereichen aus den Bilddaten unter Umständen keine 3D-Information generiert werden kann. Die 3D-Information für diese Bereiche

könnte demnach aus den Scandaten gewonnen werden. Im umgekehrten Fall können Bilddaten Informationen von Objektbereichen liefern, die durch Scanning nicht oder nur mit geringerer Genauigkeit erfasst werden können ([AGL07]).

Durch die gemeinsame Datennutzung von Bild- und Scandaten sollen die Vorteile beider Verfahren und somit das Informationspotential beider Datentypen maximal genutzt werden, indem die Schwächen oder Unzulänglichkeiten des einen Verfahrens durch die Stärken des anderen Verfahrens kompensiert werden ([Prz05], [Luh10a]). Dies bedarf der Korrespondenzherstellung und somit der Erkennung, Extraktion und Zuordnung identischer Elemente in Bild- und Scandaten.

4.2 Korrespondenzherstellung von Bild- und Scandaten

Zumeist liegen mehrere Bilder und Scans unterschiedlicher Aufnahmepositionen vor, sodass sowohl zwischen den homogenen Datentypen, als auch zwischen den heterogenen Datentypen Orientierungsberechnungen durchgeführt werden müssen:

- homogen (Bilddaten): Korrespondenzherstellung zwischen den einzelnen Bildern.
- homogen (Scandaten): Registrierung der Einzelscans unterschiedlicher Standpunkte.
- heterogen (Bild- und Scandaten): Orientierungsberechnung zwischen den Bildern und den Scans.

Abb. 4.2.1 veranschaulicht dies schematisch für zwei Bilder und zwei Scannerstandpunkte. Die beiden Korrespondenzherstellungen zwischen den homogenen Datentypen (Bild-zu-Bild) und (Scan-zu-Scan) sind jeweils außen dargestellt. Die vier unterschiedlichen Optionen für die Reihenfolge, in der die heterogenen Datentypen zueinander registriert werden können, werden durch die gleichartigen Pfeile (s. Abb. 4.2.1) repräsentiert.

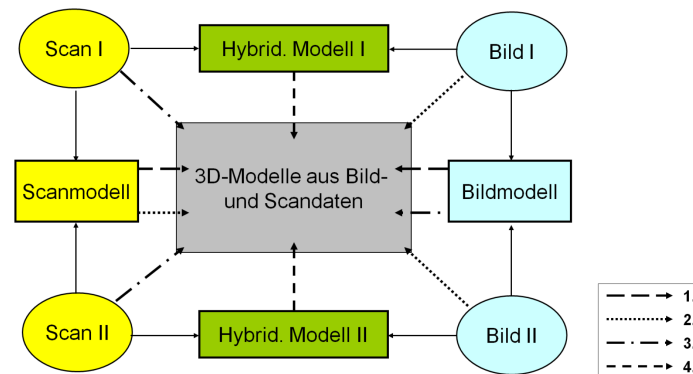


Abb. 4.2.1: Kombinations- und Fusionsmöglichkeiten von Bild- und Scandaten

4.2.1 Bild-Bild-Korrespondenz

Bei den zuvor geschilderten Eigenschaften der Bilddaten ist die notwendige Herstellung der Bild-zu-Bild-Korrespondenz bereits angesprochen worden. Sie ist essentiell, um aus der 2D-Information eine 3D-Information generieren zu können. Hierzu sind korrespondierende Elemente in den Bildern zu identifizieren und ihre Bildkoordinaten zu bestimmen. Aus den gemessenen Bildkoordinaten identischer Objektpunkte zweier oder mehrerer Bilder werden auf Grundlage der sich schneidenden Bildstrahlen die

Orientierungsparameter der Bilder und die 3D-Objektkoordinaten berechnet ([Luh10b]). Die daraus gewonnene 3D-Information ist in Abb. 4.2.1 als Bildmodell bezeichnet.

4.2.2 Scan-Scan-Korrespondenz

Die erforderliche Herstellung der Scan-Scan-Korrespondenz und die dazu existierenden unterschiedlichen Verfahren wurden in Kap. 2.5 ausführlich erläutert. Das Ergebnis der Registrierung stellt das Scanmodell (Abb. 4.2.1) dar, das die Informationen der erfassten Punktwolken beinhaltet.

4.2.3 Bild-Scan-Korrespondenz

Die Korrespondenzherstellung zwischen Bild- und Scandaten gestaltet sich aufgrund der komplementären Eigenschaften der heterogenen Datentypen als besonders schwierig. Prinzipiell lassen sich folgende Möglichkeiten unterscheiden (Abb. 4.2.1):

1. Alle Scans und alle Bilder der unterschiedlichen Standpunkte werden untereinander separat registriert. Dadurch entsteht ein 3D-Modell aus den Scan- und ein 3D-Modell aus den Bilddaten (lang gestrichelte Pfeile). Im Anschluss erfolgt die Zusammenführung der beiden heterogenen Modelle, indem identische Elemente in beiden Datensätzen identifiziert werden (3D-3D-Korrespondenz). Der Vorteil dieses Verfahrens besteht darin, dass beide Datentypen dreidimensional vorliegen und ein Vergleich zwischen den unterschiedlichen Modellierungen – kombiniertes Modell und Einzelmodell – vorgenommen werden kann, um daraus gegebenenfalls Genauigkeitsaussagen ableiten zu können.
Für die Einzelmodellierung können zwar bestehende Softwarelösungen verwendet werden, dennoch besteht ein hoher manueller Arbeitsaufwand, da zunächst die separate Modellierung aus den Scan- und Bilddaten erfolgen muss, und erst im Anschluss die gemeinsame Modellierung möglich ist. Zudem werden Ungenauigkeiten bei der Modellierung der Einzeldaten nicht berücksichtigt.
2. Die Scans unterschiedlicher Standpunkte werden registriert, wodurch aus den Einzelscans ein 3D-Scanmodell entsteht. Im Anschluss werden einzelne Bilder zur Kolorierung oder Texturierung der Punktwolke verwendet oder auf die zuvor triangulierte Punktwolke projiziert (gepunktete Pfeile).
Ein wesentlicher Vorteil dieses Ansatzes besteht darin, dass die Registrierung der Einzelscans mit Hilfe existierender Software durchgeführt werden kann, allerdings bringt dies auch gleichzeitig den Nachteil mit sich, dass die daraus resultierenden Ungenauigkeiten in die spätere Modellierung einfließen.
3. Die Bilder unterschiedlicher Standpunkte werden zu einem Bildmodell verknüpft. Diesem werden die Scandaten einzelner Standpunkte hinterlegt (Strich-Punkt-Pfeile).
4. Es erfolgt eine gemeinsame Registrierung der Bild- und Scandaten für jeden Standpunkt. Diese sind in Abb. 4.2.1 als hybride Modelle bezeichnet. Abschließend erfolgt die Zusammenführung der beiden hybriden Modelle (kurz gestrichelte Pfeile), wozu eine Bild-zu-Geometrie-Korrespondenz hergestellt werden muss. Dieses Verfahren bietet das höchste Potential bei der gemeinsamen Datennutzung, da versucht wird, die Schwächen der einzelnen Messverfahren schon im ersten Registrierungsschritt zu kompensieren, und die Stärken des jeweils anderen Verfahrens zu nutzen. Beispielsweise kann an Kanten auf die Information aus den Bildern zurückgegriffen werden, anstelle der mit hohem Messrauschen behafteten Information aus dem Scan, oder die Bildinformation kann zur Segmentierung der Scandaten verwendet werden.

Die Notwendigkeit der Identifikation korrespondierender Elemente ist demnach sowohl für die Verknüpfung der homogenen, als auch zur Korrespondenzherstellung der heterogenen Datentypen gegeben.

4.3 Unterschiedliche Verfahren der gemeinsamen Datennutzung

Für die gemeinsame Verwendung von Bild- und Scandaten existieren unterschiedliche Verfahren, die verschiedene Zielsetzungen verfolgen. Im einfachsten Fall erfolgt die Einfärbung der Punktwolke mit Hilfe der Information aus den Kameradaten. Hierbei muss die Orientierung von Kamera und Scanner bekannt sein bzw. ermittelt werden. Oftmals wird hierzu eine Kamera am Scanner adaptiert oder die Kamera wird nach Abschluss des Scanvorganges so auf dem Scannerstandpunkt positioniert, dass ein festgelegter Drehpunkt (Nodalpunkt) der Kamera im Nullpunkt des Scannerkoordinatensystems liegt (vgl. Kap. 4.4). [KPL06] unterscheidet die Begriffe Kombination und Fusion bzw. Integration von Bild- und Scandaten: Während bei der Datenkombination die ursprünglichen Daten erhalten bleiben, stellt die Datenfusion bzw. -integration die Vereinigung bzw. Verschmelzung beider Datensätze dar. Eine farbige Punktwolke, entstanden aus der Laserscannerpunktwolke und den Farbwerten aus der Bildinformation, ist demnach das Ergebnis einer Datenfusion.

[Rön07] nimmt eine Einteilung der unterschiedlichen Verfahren für die fusionierte Nutzung von Bild- und Scandaten vor. Alle Methoden haben das übergeordnete Ziel, die beiden Datentypen so einzusetzen, dass ihre komplementären Eigenschaften und somit das Potential der gemeinsamen Datennutzung mehr ausgeschöpft wird. Sie unterscheiden sich allerdings in ihrer konkreten Zielsetzung.

1. Vollständigeres Modell des Objektes.

Fehlende Informationen des einen Datentyps sollen durch die Informationen des anderen kompensiert werden. Hierbei erfolgt die Verwendung von Scan- und Bilddaten für die Rekonstruktion unterschiedlicher Objektbereiche und die Erstellung eines 3D-Scanmodells sowie eines 3D-Bildmodells, zwischen denen eine Korrespondenz hergestellt werden muss (Abb. 4.3.1).

Beispielsweise können Bildinformationen von Modellteilbereichen verwendet werden, von denen keine Geometrieinformation aus den Scandaten aufgrund mangelnder Oberflächenreflexion erhalten werden konnte.

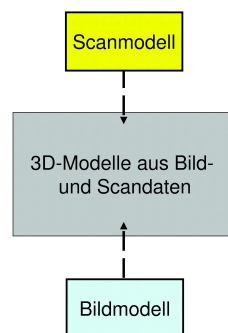


Abb. 4.3.1: Scan- und Bildmodell

2. Hauptinformation aus Scandaten.

Die Informationen beider Datentypen werden nicht gleichwertig genutzt, sondern es erfolgt die Priorisierung der Information aus Scandaten. Im Rahmen von Auswerteprozessen wird eine Triangula-

tion der Punktwolke vorgenommen. Auf das daraus resultierende Oberflächenmodell (vermaschtes 3D-Scanmodell) erfolgt im Anschluss die Projektion der Bilddaten (Abb. 4.3.2(a)). Somit wird die höhere Auflösung der Bilder genutzt, um das Oberflächenmodell zu texturieren (Abb. 4.3.2(b)).

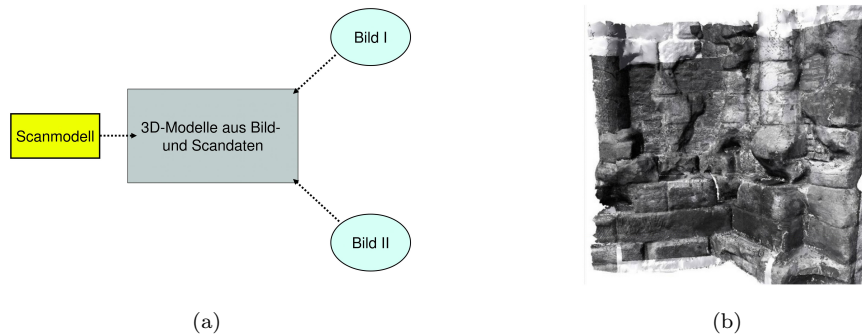


Abb. 4.3.2: Scandaten als Hauptinformationsträger – (a) Theoretische Modellierung – (b) Texturiertes Oberflächenmodell ([HS08])

3. Hauptinformation aus Bilddaten.

Ein 3D-Modell aus Bilddaten oder Orthophotos wird mit den Tiefeninformationen aus Scandaten verknüpft (Abb. 4.3.3).

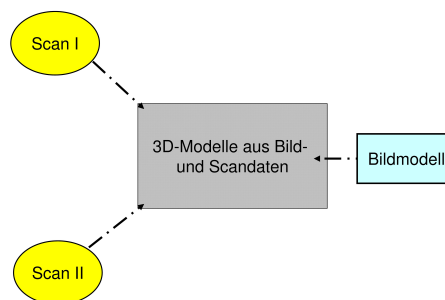


Abb. 4.3.3: Bilddaten als Hauptinformationsträger

4. Verbesserung der Registrierung von Scandaten.

Eine Reihe von Untersuchungen beschäftigt sich mit der Verbesserung der Registrierung von Scandaten durch Einbeziehung der Bildinformation, wobei die hybriden Modelle aus Bild- und Scandaten zum Einsatz kommen (Abb. 4.3.4).

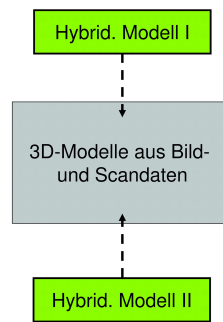


Abb. 4.3.4: *Nutzung hybrider Modelle*

[DB06], [DB04], [WH06] und [AF06] verwenden hierzu ein System, bei dem die Kamera an den Scanner adaptiert ist und nutzen damit die bekannte Orientierung von Kamera und Scanner.

4.4 Aufnahmekonfiguration

Die Aufnahmekonfiguration steht in engem Zusammenhang mit den zuvor geschilderten Verfahren, da sie das Potential der gemeinsamen Datennutzung einschränkt. Nachfolgend werden die unterschiedlichen Aufnahmekonfigurationen unterschieden und auf ihre Besonderheiten hingewiesen.

1. Scanner mit integrierter Kamera

Die Kamera ist im Scanner integriert und fester, nicht veränderbarer Bestandteil. Die Farbinformation der Kamera kann genutzt werden, um die Punktwolke zu kolorieren. Realisiert ist dies beispielsweise beim Leica-Scanner HDS 3000 oder beim Faro Focus3D. Aufgrund der fest integrierten Kamera wird die Orientierung zwischen dem Projektionszentrum und dem Scannernullpunkt als unveränderlich angenommen.

Die Kamera besitzt aufgrund ihres Einbaus in den Scanner ein geringes Sichtfeld. Es können keine Kamerakomponenten getauscht werden, um auf besondere Bedingungen, wie beispielsweise unterschiedliche Belichtungsverhältnisse, zu reagieren. Bei günstigen Lichtbedingungen kann die Punktwolke koloriert werden.

2. Scanner mit adaptierter Kamera

Die Kamera befindet sich nicht im Scanner selbst, sondern ist an diesem adaptiert. Sie ist somit abnehmbar bzw. austauschbar. Ein solches hybrides Messsystem stellt beispielsweise der Riegl Scanner LMS Z-420i dar (Abb. 4.4.1(b)).

Die Verwendung hybrider Aufnahmesysteme bietet den Vorteil, eine Kalibrierung des Gesamtsystems vor der eigentlichen Messaufgabe durchführen zu können. So lassen sich die Transformationsparameter zwischen Kamera- und Scannerkoordinatensystem ermitteln, wenn die Kalibrierparameter der aufgesetzten Kamera und die Mounting-Parameter, d.h. die Parameter, welche die Orientierung zwischen Scanner und Kamera beschreiben, bekannt sind.

Ein weiterer Vorteil dieser adaptierten Kamera liegt darin, dass durch den Austausch der Kamera oder einzelner Kamerakomponenten, wie beispielsweise des Objektivs, auf spezielle Anforderungen reagiert werden kann. Zudem weisen Kamera und Scanner die gleiche Blickrichtung auf, was bei der Identifikation von identischen Strukturen von Vorteil ist. Als Nachteil ergibt sich, dass die Position der Kamera an die des Scanners gebunden ist.

3. Scanner mit externer, an seine Aufnahmeposition gebundene Kamera

Wird die Kamera so positioniert, dass ein festgelegter Drehpunkt der Kamera (Nodalpunkt) im Nullpunkt des Scannerkoordinatensystems zu liegen kommt, kann durch Drehung der Kamera um den Nodalpunkt und die Aufnahme mehrerer Bilder bei unterschiedlichen Drehwinkeln im Rahmen des späteren Auswerteprozesses ein Panoramabild erzeugt werden, das zur Texturierung der Punktwolke dient. Hierzu erfolgt der Einsatz eines Adapters (Abb. 4.4.1(a)).

Da sich die beiden Aufnahmesysteme auf denselben Referenzpunkt beziehen, besitzen sie die gleiche Perspektive, was eine spätere Zuordnung identischer Strukturen der Bild- und Scandaten wesentlich erleichtert. Des Weiteren gelten auch hier die zuvor genannten Vorteile der freien Wahl einzelner Kamerakomponenten, und der Nachteil der an den Scannerstandpunkt gebundenen Kameraposition.

Mit den in Kap. 2 und 3 beschriebenen Verfahren ergibt sich die Möglichkeit, die Punktwolke zu kolorieren. Ein Nachteil besteht allerdings darin, dass die höhere Auflösung der Bilddaten nicht verwendet wird. Punkte, die über keine Geometrieinformation verfügen, da sie beispielsweise aufgrund mangelnder Reflexion der Oberfläche vom Scanner nicht erfasst werden konnten, sind im Bild zwar sichtbar, aber stehen aufgrund der fehlenden 3D-Information nicht für die spätere Darstellung zur Verfügung. Damit geht die vorliegende Bildinformation verloren. Zudem ist die Position der Kamera an die Wahl des Scannerstandpunktes gebunden, und es verbleiben gewisse Abweichungen zwischen den beiden Nullpunkten der Sensorsysteme, die sich in einer "Verschiebung der Farbinformation" in der Punktwolke äußern kann.



(a)



(b)

Abb. 4.4.1: Scanner mit adaptierter Kamera – (a) Nodalpunktadapter zum Aufbau der Kamera auf dem Scannerstandpunkt (Leica Geosystems – Cyclone External Camera Workflow) – (b) Laserscanner Riegl LMS Z420i

4. Scanner mit externer, frei geführter Kamera

Kamera und Scanner werden unabhängig voneinander für die Objekterfassung eingesetzt, d.h. Geometrie und Textur werden durch zwei unabhängige Prozesse gewonnen, was nach [AHF07] bestmögliche Aufnahmebedingungen schafft. Die Flexibilität der Bildaufnahme zeigt sich in einer frei wählbaren Kamera sowie einem frei definierbaren Aufnahmestandpunkt, an dem oftmals bessere Lichtbedingungen als am Scannerstandpunkt herrschen.

Nach [AN06] können Probleme bei sich verändernden Bedingungen, wie z.B. sich bewegenden Objekten, zudem durch die freie Wahl des Aufnahmezeitpunktes vermieden werden.

Den genannten Vorteilen steht der Nachteil gegenüber, dass für die fusionierte Datennutzung Orientierungsberechnungen heterogener Datentypen durchzuführen sind, die eine zuverlässige Detektion

identischer Elemente aus Bild- und Scandaten erfordert.

Liegen aufgrund der Aufnahmekonfiguration bestimmte Rahmenbedingungen vor, ist beispielsweise die Orientierung von Scanner und Kamera zueinander bekannt, vereinfacht sich zwar eine spätere Identifikation identischer Strukturen, gleichzeitig sind damit aber auch Einschränkungen bei der Flexibilität der Aufnahme verbunden.

Wird hingegen eine externe, frei geführte Kamera verwendet, erhöht sich zwar die Flexibilität bei der Datenerfassung, die Identifikation korrespondierender Elemente gestaltet sich allerdings schwieriger, da die Daten aus unterschiedlicher Perspektive erfasst werden. Neben den sich komplementär ergänzenden Eigenschaften sind deshalb jene Eigenschaften zu suchen, die sich für eine möglichst universelle Korrespondenzherstellung von Bild- und Scandaten am besten eignen.

4.5 Existierende Ansätze zur Datenfusion

4.5.1 Überblick

Die existierenden Ansätze zur Datenfusion von Bild- und Scandaten streben oftmals eine verbesserte Registrierung der Scandaten mit Hilfe der Bildinformation an (vgl. Kap. 4.3). Hierbei erfolgt zumeist der Einsatz eines Scanners mit adaptierter Kamera, d.h. eines hybriden Messsystems ([DB06], [Wen07], [AF06]).

Nach [Luh10a] lassen sich mit Methoden der Bildanalyse zahlreiche Merkmale in Bildern extrahieren, die sich aufgrund ihrer Oberflächengestalt oder Reflektanz in Laserscanningpunktvolken nicht erkennen oder segmentieren lassen. Diese Tatsache wird genutzt, um identische Elemente unterschiedlicher Standpunkte in den Bildern zu identifizieren und eine Korrespondenz zwischen den Bildern herzustellen. Die Bildinformation kann im Anschluss zur Korrespondenzherstellung der Scandaten benutzt werden. Dies ist möglich, da die relative Orientierung zwischen Kamera und Scanner als bekannt vorausgesetzt bzw. vorab durch ein Kalibrierverfahren des Scannerherstellers ([Wen07]) ermittelt werden kann. Somit können über die Bildkorrespondenzen auch die Korrespondenzen zwischen einzelnen Scans hergestellt werden.

Die existierenden Verfahren unterscheiden sich bezüglich der in den Bildern zu identifizierenden Elemente. [DB06] beschreibt einen Ansatz zur Registrierung von Scandaten mittels Ebenen. Dieser soll durch die Kamerabilder, die Texturen der Ebenen liefern, verbessert werden. [Wen07] setzt Interest-Operatoren (Kap. 3.2.3.2) ein. Hierdurch soll ein höherer Automatisierungsgrad bei der Registrierung der Scandaten erreicht werden. In [WH06] wird ein Ansatz zur simultanen Orientierungsbestimmung unterschiedlicher Sensordaten mit Hilfe von Helligkeitsbildern aus Kameradaten sowie Distanz- und Intensitätsbildern (Abb. 4.5.1) aus Scandaten beschrieben.

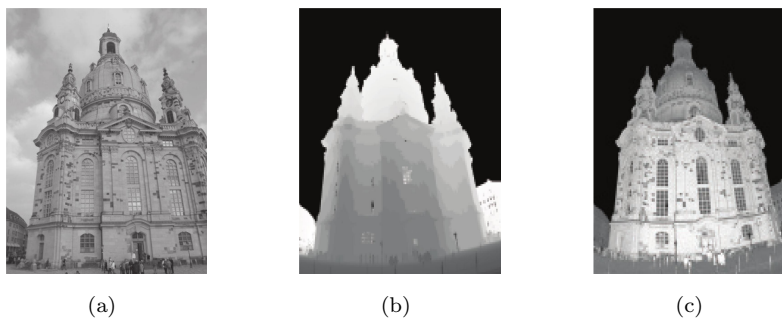


Abb. 4.5.1: *Unterschiedliche Bildtypen ([WH06]) – (a) Kamerabild – (b) Distanzbild – (c) Intensitätsbild*

[AF06] registriert die Punktwolken unterschiedlicher Standpunkte mit Hilfe von codierten Zielmarken, die ebenfalls über die mit dem Scanner verbundene Kamera identifiziert werden. Die Bilder der Kamera werden zunächst relativ orientiert, die äußere Orientierung wird über die bekannte Beziehung zum Scannerkoordinatensystem hergestellt (Abb. 4.5.2).

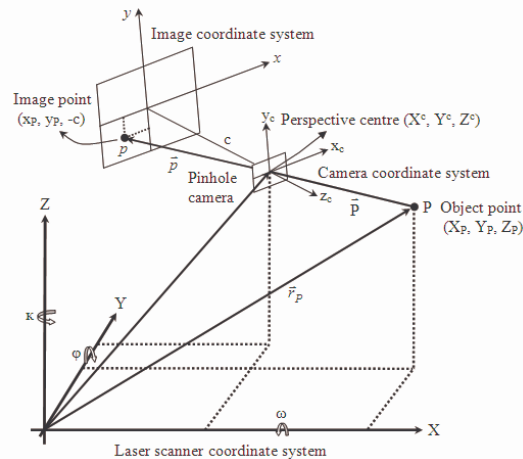


Abb. 4.5.2: Relative Orientierung zwischen Kamera- und Scannerkoordinatensystem nach [AF06]

Durch eine Bündelblockausgleichung kann die Registrierung mehrerer Punktwolken in einem Auswertungsschritt erfolgen. Die Nutzung codierter Zielmarken sorgt dabei für einen vollautomatischen Ablauf.

[RHBR06] verwendet ebenfalls einen Scanner mit adaptierter Kamera und beschreibt ein Verfahren, bei dem die Entfernungsinformation aus den Scandaten dem Bild hinterlegt wird. Dieses Verfahren wird auch als Monoplotting bezeichnet. Im vorgestellten Ansatz identifiziert der Bearbeiter spezielle Bildpunkte, für die eine 3D-Information generiert werden soll. Für den jeweils ausgewählten Bildpunkt wird der zugehörige Bildstrahl ermittelt. Im Anschluss erfolgt die Bestimmung der Scanpunkte, die dem Bildstrahl am nächsten liegen und die Berechnung eines lokalen, approximierten Oberflächenmodells aus diesen Scanpunkten. Abschließend wird der Bildstrahl mit der approximierten Oberfläche verschnitten, sodass für den Bildpunkt eine Entfernungsinformation erhalten wird. Das Monoplotting wird ausführlich in [Bec05] und [BBE04] thematisiert.

[Als06], [AHF07], [AGL07], [Abd05] und [Abd09] stellen Verfahren mit einer unabhängig von der Scannerposition eingesetzten Kamera vor. [Als06] bzw. [AHF07] nutzen lineare Strukturen für die Korrespondenzherstellung von Bild- und Scandaten. Zur Extraktion dieser Strukturen aus Intensitäts- und Distanzbildern der Scans sowie der entsprechenden 2D-Linien in den Bilddaten werden kantenbasierte Segmentierungsverfahren verwendet. Die Bestimmung der Kanten in den Scandaten erfolgt durch eine Analyse der mittleren Krümmung. Die berechneten Krümmungen werden entlang von Profillinien in den Distanzbildern extrahiert. Tiefensprünge zeigen sich in deutlichen Minima oder Maxima der mittleren Krümmung. Diese lassen sich in konvexe oder konkave Kanten unterscheiden, indem die Beträge der mittleren Krümmung herangezogen werden. Die aus den Scandaten extrahierten Linien werden interaktiv ihren 2D Entsprechungen im Bild zugeordnet. Die Zielsetzung besteht in der Texturierung der Bilddaten mit Hilfe der Scandaten.

[AGL07] fusioniert Bild- und Scandaten durch ein Matching der aus den Scandaten erhaltenen Distanzbilder und der hochauflösten Kamerabilder. Hierbei fallen mehrere Vorverarbeitungsschritte an: Bei-

spielsweise erfolgt eine Auswahl eines „Area of Interest“ durch den Benutzer, sodass in beiden Bildern der selbe Ausschnitt der Szene zu sehen ist. Die Distanzbilder der Scandaten werden interpoliert, um eine gleichmäßigere Verteilung zu erhalten. Die Kamerabilder werden im Kontrast verbessert sowie radiometrisch angeglichen. Die Extraktion der Bildinformation erfolgt mit Hilfe von Interest-Operatoren, die Verknüpfung der Bilder mittels Kreuzkorrelation.

Die Kamerabilder werden nicht nur zur Texturierung eingesetzt. Gefundene Merkmale im Bild werden dazu benutzt, die Segmentierung in dem zuvor triangulierten Scan-Modell zu komplettieren bzw. zu verbessern.

In [Abd05] und [Abd09] erfolgt eine gemeinsame Registrierung von Bild- und Scandaten durch eine Bündelblockausgleichung. Zuvor wird eine Kamerakalibrierung zur Bestimmung der inneren Orientierung durchgeführt. Im zweiten Schritt werden interaktiv natürliche Punkte in den Scandaten identifiziert, die als Näherungswerte für die Bündelblockausgleichung verwendet werden.

Nach erfolgreicher Korrespondenzherstellung kann für jeden Scanpunkt eine Farbinformation aus dem Bild, für einen Teil der Bildpunkte die Geometrieinformation aus dem Scan abgegriffen werden. Für die Bildpunkte, denen aufgrund der geringeren Auflösung der Scandaten nicht direkt eine Geometrieinformation hinterlegt werden kann, erfolgt die Interpolation der Objektdistanz aus den angrenzenden Scanpunkten. Fehlerhafte Punktmessungen in den Scandaten müssen dabei vor der Interpolation eliminiert werden. Ansonsten entstehen vor allem an Ecken und Kanten schlechte Ergebnisse. Das Verfahren kann ebenfalls in den Bereich des Monoplottings eingeordnet werden.

Zudem existieren Lösungsansätze aus dem Bereich Computer Vision. Deren Zielsetzung besteht zumeist in einer geringeren User-Interaktion bzw. einem effizienten Einsatz von Algorithmen. [SA00] nutzt die Distanzbilder aus Scandaten und Kamerabilder. Die Scandaten werden in ebene Regionen segmentiert und eine automatisierte 3D-Linienerkennung durch den Schnitt zuvor gefundener Ebenen realisiert. Die segmentierten Ebenen werden zudem für die Registrierung der Scans untereinander verwendet. In den 2D-Bildern erfolgt die Kantenfindung mittels Bildverarbeitungsalgorithmen. Im Anschluss findet das Matching der 3D- und 2D-Linien statt, das manuell durchgeführt wird. Eine Berücksichtigung von Messunsicherheiten findet nicht statt.

[ZNH05] beschäftigt sich mit der Registrierung von Videobildern zu einem 3D-Scanmodell, d.h. der Bestimmung der Bildposition relativ zur 3D-Szene. Hierzu wird zunächst ein 3D-Bildmodell aus einer Sequenz von Bildern durch Anwendung eines SfM-Algorithmus (vgl. Kap. 3.2.5) oder eines Stereomodells erzeugt. Anschließend erfolgt die Registrierung dieses 3D-Bildmodells zum 3D-Scanmodell durch einen ICP-Algorithmus (vgl. Kap. 2.5.2.2). Der Vorteil dieser 3D-3D-Registrierung besteht darin, fehlende Informationen der einen Datenquelle durch die Information der anderen zu kompensieren und so ein vollständigeres Modell zu erhalten (vgl. Kap. 4.3).

[SLC⁺08] stellt ein Verfahren vor, das unterschiedliche Registrierungen der 2D-Bilder und 3D-Scans erlaubt (vgl. Kap. 4.2):

1. Bild-zu-Bild (2D-2D): Einsatz eines SfM-Algorithmus zur Erzeugung eines 3D-Bildmodells.
2. Scan-zu-Scan (3D-3D): Verknüpfung der Scandaten verschiedener Standpunkte zu einem 3D-Scanmodell mit Hilfe von dreidimensionalen Linien- oder Kreisobjekten.
3. Bild-zu-Scanmodell (2D-3D): Matching von 2D- und 3D-Strukturen und Verwendung der Bilder zur Texturierung des 3D-Scanmodells.
4. Bildmodell-zu-Scanmodell (3D-3D): Die Erzeugung des 3D-Bildmodells („sparse point cloud“) und des 3D-Scanmodells, das aufgrund der hohen Punktdichte als „dense point cloud“ bezeichnet wird.

Zur Erzeugung eines texturierten 3D-Modells (siehe 3.) muss die Bestimmung der Kameraposition und Orientierung in Bezug zum Scannermodell erfolgen, sodass alle 2D- und 3D-Daten in einem gemeinsamen Koordinatensystem vorliegen, und die Bilder auf das Scanmodell projiziert werden können. [SLC⁺08] verwendet hierzu linienhafte Merkmale, die in Bild- und Scandaten mit Hilfe von Deskriptoren extrahiert und einander zugeordnet werden. Mit dieser Methode können Bilder, die über eine ausreichende Anzahl dieser linienhaften Merkmale verfügen, registriert werden. Dies trifft allerdings nur für einen Teil der Fotos zu, sodass nicht alle Bilder zur Texturierung verwendet werden können. Details zum Verfahren des automatisierten Texture-Mapping auf 3D-Daten sind [SA01] und [LS05] zu entnehmen. [SA01] nutzt beispielsweise Orthogonalitäts- und Parallelitätsbedingungen von Linien. [LS05] beschreibt die Extraktion von Linien und Ebenen aus dem 3D-Scan sowie die Verknüpfung der Bilder und Scans über eine gemeinsame Struktur, z.B. Parallelepipeds und Rechtecke.

Um die Information aller Bilder verwenden zu können, wird eine Bildmodell-zu-Scanmodell-Registrierung durchgeführt (siehe 4.). Diese ermöglicht eine vollständigere Modellierung (vgl. Kap. 4.3) unter Nutzung der beiden heterogenen Datentypen. Ein Algorithmus zur Orientierungsberechnung zwischen den beiden Modellen wird in [LYWZ06] vorgestellt.

Neben den genannten Verfahren existieren eine Reihe von Arbeiten, die eine Verknüpfung von Luftbildern und LIDAR-Daten (Light Detection and Ranging) aus dem flugzeuggestützten Laserscanning thematisieren, z.B. [DLZ08] oder [MKF05]. [Vos02] und [Bre05] setzen sich mit dieser Thematik unter Berücksichtigung der Rekonstruktion von Gebäuden auseinander. [JC08] stellt ein Verfahren zur Rekonstruktion von Dächern vor. In [PV09] wird eine Verbesserung in der Modellierung angestrebt, indem Linien aus Bildern extrahiert werden, um die Gebäudemodelle aus terrestrischen Laserscandaten zu verbessern. Die Linien werden unter Verwendung eines Canny-Kantendetektors und einer Hough-Transformation extrahiert.

4.5.2 Zusammenfassung und Beurteilung der Verfahren

Aus den zuvor genannten Verfahren wird deutlich, dass sich eine Korrespondenzherstellung von Bild- und Scandaten auf unterschiedliche Arten realisieren lässt. Einige der in Kap. 4.5.1 beschriebenen Verfahren verwenden ein hybrides Messsystem, bei dem die Kamera an den Scanner adaptiert ist. Dies bietet für die Zielsetzung einer verbesserten Registrierung durch Verwendung der Bildinformation Vorteile, schränkt jedoch die Flexibilität bei der Bildaufnahme ein.

Die Wahl des Verfahrens zur Extraktion von Strukturen aus Scandaten bestimmt zugleich die dabei erreichbare Genauigkeit. Diese ist bei dem von [Als06] eingesetzten Verfahren zur Extraktion von Kanten mittels Krümmung geringer einzuschätzen als bei der Extraktion von Kanten durch Bestimmung aus den Schnitten der sie begrenzenden Flächen, wie von [SA00] und [BB06] vorgeschlagen.

Eine Beschreibung der unterschiedlichen Verfahren zur Schätzung der Krümmung aus Distanzbildern unter Berücksichtigung der Problematik der hohen Rauschempfindlichkeit ist in [Böh05b] zu finden.

Die von [Wen07] beschriebene Methode zeigt sich fehleranfällig bei schwacher Texturierung und der eindeutigen Identifikation ähnlich aussehender oder sich wiederholender Merkmale in den Bildern. Diese Problematik könnte durch den Einsatz von Passobjekten oder Zielmarken umgangen werden, die eine Unabhängigkeit vom aufzunehmenden Objekt und einen höheren Automatisierungsgrad ermöglichen.

Der von [Abd09] vorgestellte Lösungsansatz ermöglicht eine Korrespondenzherstellung von Bild- und Scandaten unter Nutzung einer frei geführten Kamera. Er erfordert jedoch eine manuelle Selektion und Extraktion diskreter Scanpunkte, die mit einer hohen Unsicherheit behaftet sind.

Die Ansätze aus dem Bereich der Computer Vision liefern unterschiedliche Verfahren zur Verknüpfung von Bild- und Scandaten. Der Schwerpunkt liegt dabei zumeist auf der Verknüpfung von Bildern, die

zur Texturierung von 3D-Scanmodellen verwendet werden sollen. Die Registrierung von Scandaten unterschiedlicher Aufnahmestandpunkte wird oftmals nur am Rande thematisiert.

Das in dieser Arbeit neu entwickelte Verfahren zur Verknüpfung von Scandaten gleicht Nachteile der oben genannten Methoden aus. Gleichzeitig werden die Voraussetzungen für die gemeinsame Verwendung von Bild- und Scandaten geschaffen, die den Einsatz einer frei geführten Kamera und somit die größtmögliche Flexibilität bei der Bildaufnahme ermöglichen. Durch den Einsatz künstlicher Elemente bzw. Passkörper kann eine Unabhängigkeit von dem aufzunehmenden Objekt erreicht, die Korrespondenzherstellung – ähnlich der Scandatenregistrierung – erleichtert und ein hoher Automatisierungsgrad durch Nutzung geeigneter Algorithmen erzielt werden. Für die Gestaltung der Passobjekte ergeben sich damit gewisse Anforderungen. Sie sind so zu konzipieren, dass sie sowohl auf die Bild-, als auch auf die Scandaten abgestimmt sind und mit möglichst hoher Genauigkeit extrahiert werden können. Für die Abstimmung auf die Scandaten sind vor allem die in Kap. 2.5.2.1 und Kap. 2.5.2.3 genannten Aspekte von Bedeutung. Probleme des auftretenden Kometenschweif bei Einsatz von Kugeln sollen ebenso umgangen werden, wie die zeitintensive Zwangszentrierung rotierbarer Zielmarken. Zudem soll die Identifizierbarkeit des Passobjektes weitgehend unabhängig vom Auftreffwinkel des Laserstrahls sein, was beim Einsatz von ebenen Zielmarken (vgl. Abb. 2.5.3) nicht gewährleistet ist. Des Weiteren ist die bereits angesprochene Wahl des Verfahrens zur Extraktion von Strukturen aus Scandaten maßgebend für die erreichbare Genauigkeit. Im nächsten Kapitel erfolgt die Vorstellung des entwickelten Prototyps, der obige Aspekte konzeptionell berücksichtigt.

5 Einsatz und Gestaltung von neu entwickelten Passobjekten zur Fusion von Bild- und Scandaten

5.1 Vorüberlegungen zur Abstimmung auf Scan- und Bilddaten

Der konzeptionelle Aufbau des Passobjekts erfordert die Berücksichtigung der Eigenheiten der beiden Messverfahren, um sowohl die Registrierung von Einzelscans zu ermöglichen, als auch die Voraussetzungen für eine Verknüpfung zwischen Bild- und Scandaten zu schaffen.

5.1.1 Scandaten

Die geschilderten Verfahren zur Registrierung von Scandaten verwenden entweder die Geometrie- oder Intensitätsinformation, um Passkugeln oder Zielmarken zu identifizieren. Das neu entwickelte Verfahren soll beide Informationen zur Identifikation der Passobjekte und damit die größtmögliche Informationsdichte von Bild- und Scandaten nutzen. Folgende Aspekte finden bei der Konzeption des Passobjektes Berücksichtigung ([SB11]):

- Werden dreidimensionale Passobjekte verwendet, besteht eine Unabhängigkeit von der Zielrichtung. Es ist keine Zwangszentrierung notwendig.
- Ebene Flächen sind im Gegensatz zu unregelmäßigen Oberflächen mit relativ hoher Genauigkeit erfass- und modellierbar. Kanten sollten im Dreidimensionalen aufgrund ihres hohen Messrauschens und den damit verbundenen Ungenauigkeiten indirekt, beispielsweise über den Schnitt zweier ebener Flächen, ermittelt werden.
- Um die Intensitätsinformation nutzen zu können, müssen die Passkörper unterschiedliche Grau- und/oder Farbwerte repräsentieren. Da die Unterscheidung von Farben über die am Scanner empfangenen Intensitätswerte schwierig ist und eine Abhängigkeit der Farben von den spektralen Eigenschaften des genutzten Lasers besteht ([Con04]) (vgl. Kap. 2.3.2), sind Grauwerte vorzuziehen.
- Um in einem gewissen Entfernungsbereich zuverlässig abgebildet zu werden, müssen die Passobjekte eine gewisse Mindestgröße besitzen.

5.1.2 Bilddaten

Die speziellen Merkmale der Passkörper müssen sich auch in den Bilddaten abbilden. Um im Bild identifiziert werden zu können, muss das Passobjekt einen ausreichenden Kontrast zum Hintergrund aufweisen. Im Fall eines hinreichenden Bildkontrastes lassen sich Kantenoperatoren zur Konturerkennung einsetzen ([Luh10a]) (vgl. Kap. 3.2.3).

In einem früheren Projekt des i3mainz ([BT01]) wurden farbige Passwürfel zur Orientierungsberechnung von Bildern erfolgreich verwendet. Die farbigen Würfel heben sich aufgrund ihres höheren Kontrastes von ihrer Umgebung ab und können in den Bildern detektiert werden. Um die jeweilige Ausrichtung der Würfel sicherzustellen, erhält jede der sechs Würfelebenen eine unterschiedliche farbliche Codierung, die in den Bildern erkannt wird und somit die Zuordnung korrespondierender Ebenen in unterschiedlichen Bildern ermöglicht.

Unter Berücksichtigung der Erfahrungen dieses Projekts und der zuvor aufgezeigten Aspekte für die Scandaten entstand die konzeptionelle Idee zur Gestaltung der Passobjekte, die eine Nutzung von 3D-Körpern mit einer Grauwertcodierung vorsieht.

5.2 Modellierung der Passkörper

Aufgrund der zuvor spezifizierten Anforderungen sind einfache geometrische Körper wie Würfel oder Quader als Passobjekt für die Datenfusion von Bild- und Scandaten geeignet, wenn es gelingt jede Ebene in Scan und Bild eindeutig zu identifizieren. Da Würfelprototypen bereits vorhanden sind, kommen diese als Passwürfel für die Untersuchungen zum Einsatz.

Der Passwürfel erlaubt eine vollständige mathematische Formulierung seiner einzelnen Komponenten. Werden in den Scandaten drei Ebenen erkannt, lassen sich bei bekannter Kantenlänge die im Vordergrund liegenden Elemente direkt berechnen. Die sich im Hintergrund befindlichen Elemente können ausgehend von Orthogonalitäts- und Parallelitätsbedingungen bei bekannter Sollgeometrie rekonstruiert werden. Dies ermöglicht die Bestimmung aller sechs Ebenen, zwölf Kanten und acht Eckpunkte.

In den Bilddaten bilden sich die Kanten des Würfels bei ausreichendem Kontrast als Grauwertdiskontinuitäten ab. Sie können mit Hilfe von Algorithmen zur Kantenfindung ([Luh10b], [Kra04]) und Verfahren zur Segmentierung geometrischer Strukturen ([AGD07]), wie beispielsweise der Hough-Transformation, extrahiert werden. Die Eckpunkte des Würfels lassen sich im Anschluss durch Kantenschnitt berechnen. Die Korrespondenzherstellung von Bild- und Scandaten kann demnach durch die Würfeckpunkte realisiert werden.

Die Voraussetzung für die eindeutige Identifikation der Eckpunkte und die Ermittlung der räumlichen Ausrichtung des Würfels ist die Unterscheidbarkeit der sechs Würfebenen. Aufgrund dessen muss jede Ebene so gestaltet werden, dass sie sich in ihrem Aussehen von den anderen fünf Ebenen unterscheidet und sich diese Information sowohl in den Scan- als auch in den Bilddaten niederschlägt.

Als Unterscheidungskriterien kommen Geometrie- und Intensitätsinformationen in Frage. Prinzipiell wäre es möglich, geometrische Unterscheidungsmerkmale auf die einzelnen Ebenen aufzubringen, die im Scan erkannt und extrahiert werden müssten. Aufgrund der Divergenz des Laserstrahls bestünde hierbei jedoch die Gefahr von Abschattungen oder Mehrfachreflektionen, die zu unvollständigen oder fehlerhaften Messungen auf den einzelnen Flächen führen könnten. Eine bessere Lösung besteht in der Nutzung der Intensitätsinformation als Unterscheidungskriterium für die einzelnen Ebenen. Diese liegt direkt als Zusatzinformation für jeden Messpunkt vor und gibt Aufschluss über die Reflexion an der entsprechenden Objektposition. Demnach wäre es denkbar, die sechs Ebenen des Würfels so zu konzipieren, dass sie sich in ihrem Reflexionsverhalten eindeutig unterscheiden und beispielsweise durch verschiedene Farben oder Grauwerte repräsentiert werden. Aufgrund der zuvor genannten Abhängigkeit von Farbe von den spektralen Eigenschaften des genutzten Lasers werden keine Farben sondern Grauwerte verwendet.

Erhält jede Ebene einen anderen Grauwert, so können die einzelnen Grauwerte – trotz Nutzung einer Auflösung von 12 bit – im Scan nicht unterschieden werden, da zu geringe Differenzen ihren Intensitätswerten auftreten. Eigens durchgeführte Testmessungen zeigen allerdings, dass sich die Grauwerte weiß, grau und schwarz aufgrund ihrer hohen Reflexionsunterschiede unterscheiden lassen, wenn der Einfluss des Auftreffwinkels auf die Intensitätswerte berücksichtigt wird. Im Hinblick auf die Bilddaten ist zu beachten, dass aneinandergrenzende Ebenen in den Bildern durch unterschiedliche Intensitätswerte bzw. Grauwerte repräsentiert werden, sodass Kanten erkannt werden können.

Für das Würfelkonzept wird deshalb auf die drei Grauwerte „weiß“, „grau“ und „schwarz“ zurückgegriffen. Um die sechs Ebenen eindeutig unterscheiden zu können, muss jede Ebene über zwei dieser Grauwerte verfügen (Abb. 5.2.1).

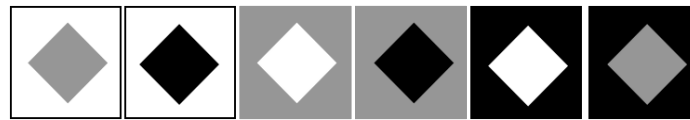


Abb. 5.2.1: Entwurf der Würfebenen

Jede Würfebene wird deshalb in eine Grund- (außen) und Symbolfläche (innen) unterteilt (Abb. 5.2.2), wobei benachbarte Grundflächen stets einen unterschiedlichen Grauwert aufweisen, sodass im Bild eine Grauwertkante entsteht. Dies bedingt zugleich, dass sich Ebenen mit identischer Grundflächenfarbe gegenüberliegen.

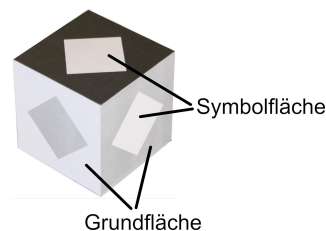


Abb. 5.2.2: Würfelkonzept: jede Ebene setzt sich aus einer Grund- und Symbolfläche zusammen

Da zwischen der Grund- und Symbolfläche unterschieden wird, lässt sich die Anzahl der Variationsmöglichkeiten allgemein in der folgenden Weise bestimmen:

$$V_n^k = \frac{n!}{(n-k)!} \quad (5.2.1)$$

Hierbei bezeichnet n die Gesamtanzahl der Grauwerte und k die Anzahl der Grauwerte bzw. Flächen einer Ebene. Somit ergeben sich mit $n = 3$ und $k = 2$ die notwendigen sechs unterschiedlich ausgeprägten Ebenen.

Die Entscheidung trotz des höheren Messrauschens den Grauwert „schwarz“ zu verwenden (vgl. Kap. 2.4), liegt darin begründet, dass die Reflektionsunterschiede für die Bestimmung der Ebenen möglichst groß sein sollen. Die schwarzen Teilflächen werden zudem bei der späteren, genauen Berechnung der Würfелеckpunkte nicht mehr berücksichtigt.

Abb. 5.2.3 zeigt einen Ausschnitt der Punktwolke in intensitätsbasierter Darstellung, wobei der Würfel noch einmal rechts oben separat zu sehen ist. Zum direkten Vergleich befindet sich darunter die Darstellung des Würfels mit Hilfe eines Kamerabildes.

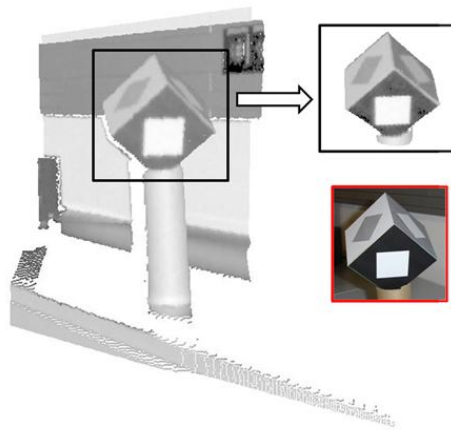


Abb. 5.2.3: Punktwolke und Kamerabild eines Passwürfels

5.3 Prototyp

5.3.1 Aufbau des Prototypen

Um die Erkennbarkeit der Passkörper bei einer bestimmten Auflösungsstufe und in einem gewissen Entfernungsbereich sicherstellen zu können, müssen diese eine Mindestgröße besitzen. Für eine praktikable Handhabung sollten die Passkörper allerdings auch nicht zu groß sein. Konkret bedeutet dies, dass die Würfelebenen mit einer gewissen Mindestpunktzahl erfasst werden müssen, die es erlaubt die Ebenen zu modellieren. Die theoretisch maximal erfassbare Punktzahl bei senkrechter Ausrichtung der Würfelebene zum Scanner lässt sich mit Hilfe der Entfernungen, der Kantenlängen des Würfels und der Auflösungsstufen des Scanners ermitteln.

In ersten Tests mit dem Laserscanner HDS 6000 haben sich Würfel mit einer Kantenlänge von 100mm für einen Entfernungsbereich bis ca. 15m als brauchbar erwiesen (vgl. Tab. 2.2.1).

Die Würfel sind industriell gefertigte Kunststoff-Vollkörper (Abb. 5.3.1 (a)). Die Gestaltung der Passkörper erfolgt gemäß der zuvor beschriebenen Vorgaben (Abb. 5.3.1 (b) und 5.3.1 (c)).

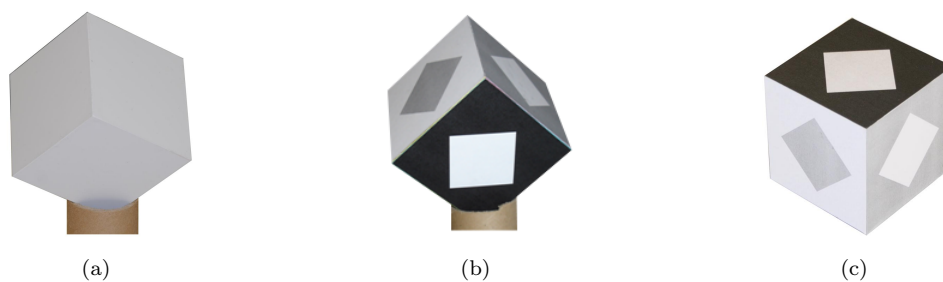


Abb. 5.3.1: Prototyp des Würfels – (a) Ohne Beklebung auf Adapter – (b) Beklebter Würfel auf Adapter – (c) Beklebter Würfel ohne Adapter

Die Ebenen des Würfels werden mit den in Abb. 5.2.1 vorgestellten Mustern beklebt. Als Symbolfläche der Ebenen wird ein Quadrat verwendet, dass gegenüber der Grundfläche um 45° gedreht ist. Die Größe der Symbolfläche beträgt 25cm^2 , die der Grundfläche 75cm^2 (Prototyp 1).

In einer ersten Testphase erfolgte zudem die Konzeption eines zweiten Prototypen, der sich auf drei

der sechs Ebenen hinsichtlich der Form der Symbolflächen – Kreise statt Quadrate – unterscheidet. Durch eine Analyse der Form der Symbolfläche sollte eine Unterscheidung der Ebenen ermöglicht werden. Auswertungen der Scandaten zeigten allerdings, dass die Unterscheidbarkeit einzelner Formen aufgrund der geringen Auflösung im Scan – vor allem bei großem Auftreffwinkel – nicht immer gewährleistet ist.

5.3.2 Prüfung der Würfelgeometrie

Um den Würfel als Passkörper verwenden zu können, muss seine Geometrie – d.h. die Einhaltung der Kantenlängen sowie die Orthogonalität und Parallelität der Ebenen – untersucht werden. Hierzu erfolgt die photogrammetrische Vermessung des Würfels mit dem Streifenlichtprojektionsscanner GOM Atos III ([GOM11]). Details zum Messverfahren sind unter anderem in [Gür02], [Prz07] und [Gor08] zu finden.

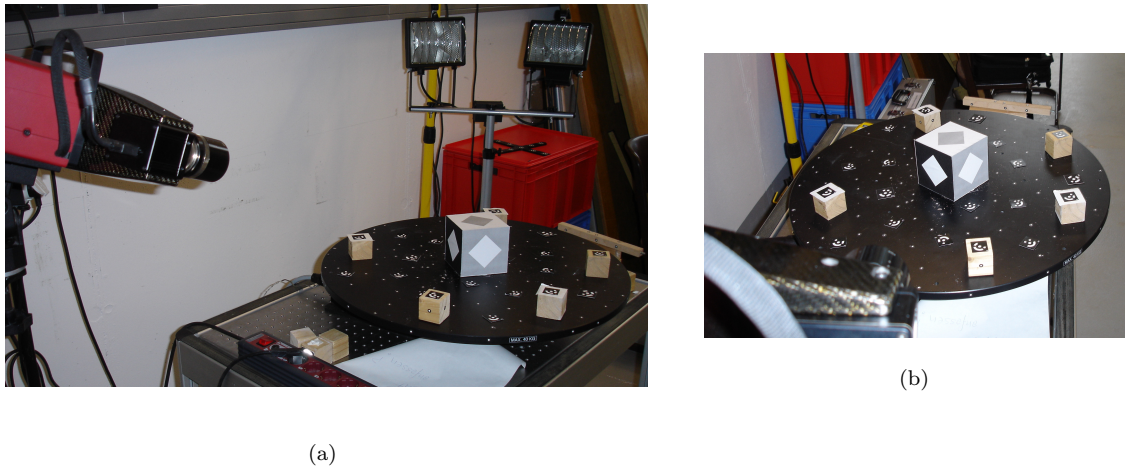


Abb. 5.3.2: Messung des Würfels mit dem Scanner GOM-Atos III ([GOM11]) – (a) Ansicht 1 – (b) Ansicht 2

Zur Erfassung des Würfels aus unterschiedlichen Perspektiven wird der Würfel auf einem Drehteller gelagert (Abb. 5.3.2), der automatisiert nach jeder Aufnahme um 30° gedreht wird.

Nach Abschluss der Datenerfassung lassen sich die Ebenen des Würfels – mit Ausnahme der Bodenfläche – bestimmen. Im Anschluss werden die Ebenen verschnitten und die Eckpunkte des Würfels berechnet. Die oberen Eckpunkte können dabei direkt ermittelt, die unteren Eckpunkte durch Parallelverschiebung der oberen Ebene und Verschneidung der angrenzenden Ebenen bestimmt werden. Danach erfolgt die Berechnung der Abstände benachbarter Eckpunkte (Kantenlängen) sowie die Bestimmung der Winkel zwischen zwei benachbarten Ebenen (Abb. 5.3.3).

Als Ergebnis der Messung ergibt sich die mittlere Kantenlänge $k_{lm} = 100.29\text{mm}$ mit einer Standardabweichung von $s_{kl} \pm 0.14\text{mm}$ sowie die mittlere Winkelabweichung $w_{mg} = 0.08^\circ$. Dies entspricht der metrischen Winkelabweichung $w_{mm} = 0.14\text{mm}$ bei einer Kantenlänge $k_l = 100\text{mm}$ (5.3.1).

$$\frac{w_{mm}}{k_l} = w_{mg} \cdot \frac{\pi}{180} \quad (5.3.1)$$

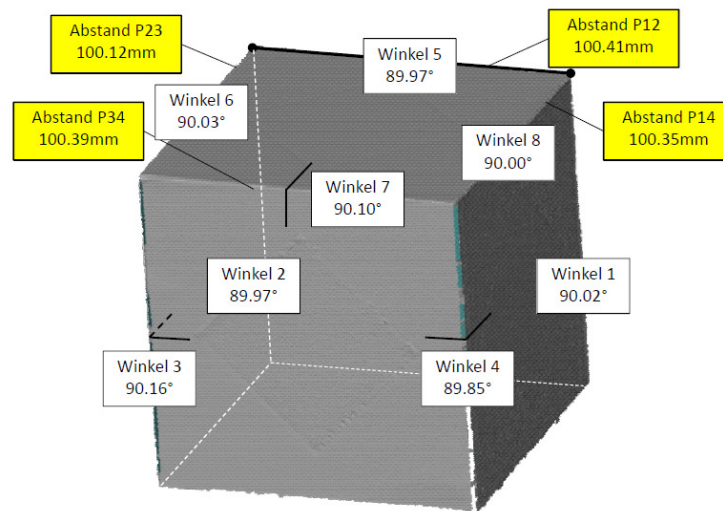


Abb. 5.3.3: Berechnete Winkelmaße und Punktabstände der Messung mit dem Scanner GOM-Atos III

Für die spätere Betrachtung des Fehlerbudgets (vgl. Kap. 6.3.1) wird keine strikte Trennung zwischen der Standardabweichung der Kantenlänge und der mittleren Winkelabweichung vorgenommen. Sie werden zu einer Größe zusammengefasst. Diese wird weiterhin als Standardabweichung der Kantenlänge bezeichnet, berücksichtigt aber auch die berechnete mittlere Winkelabweichung mit ihrer metrischen Größe w_{m_m} .

6 Würfelkonzeption

6.1 Topologisches Würfelmodell

6.1.1 Einzelkomponenten des Würfels und ihre Codierungen

Neben der Gestaltung der einzelnen Ebenen des Würfels sind ihre topologischen Beziehungen zueinander von besonderer Wichtigkeit, weshalb die Ebenen eine festgelegte Anordnung auf dem Würfel einnehmen und nur bestimmte Nachbarschaften von Ebenen existieren. Aufgrund der bereits erwähnten notwendigen unterschiedlichen Grundflächenfarben zweier Nachbarebenen, können keine zwei Ebenen gleicher Grundflächenfarbe eine gemeinsame Kante besitzen.

Erfolgt die Zerlegung des Würfels in seine einzelnen Elemente, werden sechs Ebenen, zwölf Kanten und acht Eckpunkte erhalten, deren topologische Beziehungen definiert und abgebildet werden müssen. Eine Kante ist der Schnitt zweier benachbarter Ebenen. Ein Eckpunkt entsteht durch den Schnitt dreier Kanten. Die Formalisierung des topologischen Modells erfolgt durch die Vergabe eines Codes für jedes Element. Dieser Code enthält zugleich Informationen über die Nachbarobjekte des jeweiligen Elementes.

6.1.1.1 Ebenencodierung

Für die Ebenen werden zwei Codes unterschieden:

- Der Flächencode bzw. Grauwertcode ist ein Zahlencode und repräsentiert den Grauwert einer Teilfläche (Grund- oder Symbolfläche) einer Ebene. Jede Ebene besitzt einen Flächencode für die Grund- und einen Flächencode für die Symbolfläche. Er kann die Werte gemäß Tab. 6.1.1 annehmen.

Tab. 6.1.1: Flächen- bzw. Grauwertcode

Flächen- bzw. Grauwertcode	1	schwarz
	2	grau
	3	weiß

- Der Ebenencode gibt die Grauwerte beider Teilflächen einer Ebene wieder und ist somit eine Kombination der beiden Flächencodes. Er lässt sich in Form einer Buchstaben- oder einer Zahlenkombination ausdrücken. Die Buchstabenkombinationen sind Abkürzungen für die Grauwerte der Grund- und Symbolflächen. Der erste Buchstabe wird dabei groß geschrieben und repräsentiert die Grundfläche, der zweite Buchstabe bezeichnet die Symbolfläche. Die Zahlencodierung der Ebenen erfolgt aufsteigend vom höchsten zum niedrigsten erwarteten Reflexionswert.

Da der zu erwartende Reflexionswert für die Ebene mit weißer Grund- und grauer Symbolfläche (Wg) am höchsten ist, erhält diese Ebene die Codierung (1).

Die Zusammenstellung der Codierungen ist der Tabelle 6.1.2 zu entnehmen. Besitzt eine Ebene beispielsweise eine weiße Grundfläche (3) und eine schwarze Symbolfläche (1), so erhält sie den Ebenencode (2) bzw. (Ws).

Tab. 6.1.2: *Codierung der Würfebenen*

Flächencode		Ebenencode	
Grundfläche	Symbolfläche		
3	2	Wg	1
3	1	Ws	2
2	3	Gw	3
2	1	Gs	4
1	3	Sw	5
1	2	Sg	6

6.1.1.2 Kanten- und Eckpunktcodierung

Die Kanten des Würfels werden durch die Schnittgeraden zweier angrenzender Ebenen repräsentiert, weshalb sich die Kantencodierungen aus den beiden betreffenden Ebenencodierungen zusammensetzen. Die Kante, die aus dem Schnitt der Ebenen Wg (1) und Sw (5) hervorgeht, erhält demnach die Codierung (15). Der Code wird so gebildet, dass der niedrigere Zahlenwert stets an erster Stelle steht. Analog gilt dies für die Eckpunkte, die durch den Schnitt dreier Ebenen erhalten werden. Zwei Eckpunkte besitzen eine gemeinsame Kante, wenn in ihrer Codierung zwei identische Ziffern beinhaltet sind. Somit sind die beiden Eckpunkte (145) und (245) über die Kante (45), die wiederum die Ebenen (4) und (5) voneinander abgrenzt, verbunden.

Die Tabellen 6.1.3 und 6.1.4 geben eine Übersicht der möglichen Kanten- und Eckpunktcodierungen.

Tab. 6.1.3: *Codierung der Würfelkanten*

Ebenencode 1	Ebenencode 2	Code der Kante
Wg (1)	Gw (3)	13
Wg (1)	Gs (4)	14
Wg (1)	Sw (5)	15
Wg (1)	Sg (6)	16
Ws (2)	Gw (3)	23
Ws (2)	Gs (4)	24
Ws (2)	Sw (5)	25
Ws (2)	Sg (6)	26
Gw (3)	Sw (5)	35
Gw (3)	Sg (6)	36
Gs (4)	Sw (5)	45
Gs (4)	Sg (6)	46

Tab. 6.1.4: Codierung der Würfeckpunkte

Ebenencode 1	Ebenencode 2	Ebenencode 3	Code des Eckpunktes
Wg (1)	Gw (3)	Sw (5)	135
Wg (1)	Gw (3)	Sg (6)	136
Wg (1)	Gs (4)	Sw (5)	145
Wg (1)	Gs (4)	Sg (6)	146
Ws (2)	Gw (3)	Sw (5)	235
Ws (2)	Gw (3)	Sg (6)	236
Ws (2)	Gs (4)	Sw (5)	245
Ws (2)	Gs (4)	Sg (6)	246

6.1.2 Möglichkeiten der Ebenenanordnung

Von einem Standpunkt können maximal drei Ebenen eines Würfels erfasst werden. Die sich daraus ergebenden Ebenenanordnungen werden im Folgenden dargestellt.

Jeweils drei Ebenen sind benachbart, wenn sie sich in ihrer Grundflächenfarbe unterscheiden. Als benachbarte Ebenen kommen damit nur bestimmte Ebenenkombinationen in Betracht, die im Würfelstrukturbaum der Abb. 6.1.1 schematisch dargestellt sind.

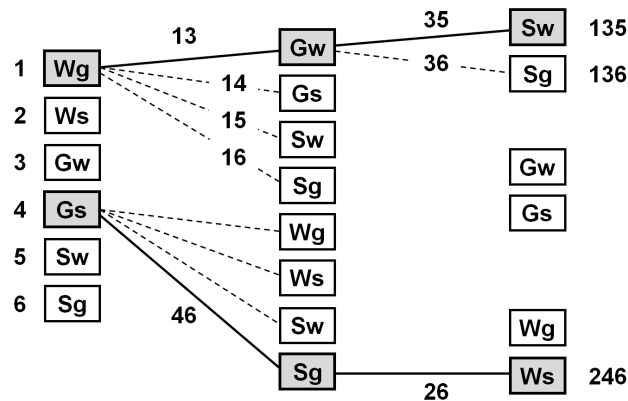


Abb. 6.1.1: Würfelstrukturbaum

Die für den Würfel gültigen Kombinationen $K_{W(k)}$ berechnen sich nach den allgemeinen Kombinationsmöglichkeiten $K_{allg(k)}$ abzüglich der ausgeschlossenen Kombinationen $K_{aus(k)}$.

$$K_{W(k)} = K_{allg(k)} - K_{aus(k)} \quad (6.1.1)$$

mit

$$K_{allg(k)} = \binom{n}{k} = \binom{n}{n-k} = \frac{n!}{k!(n-k)!} \quad (6.1.2)$$

Hierbei entspricht n der Gesamtanzahl der Ebenen ($n = 6$) und k der Anzahl der sich schneidenden Ebenen. Für eine Kante beträgt $k = 2$, für einen Eckpunkt beträgt $k = 3$. Nach (6.1.2) gilt damit für die

Kanten: $K_{allg(2)} = 15$, $K_{aus(2)} = 3$ und somit $K_{W(2)} = 12$, für die Eckpunkte: $K_{allg(3)} = 20$, $K_{aus(3)} = 12$ und somit $K_{W(3)} = 8$.

Eine anschauliche Übersicht der Nachbarschaftsbeziehungen der Elemente liefert das in Abb. 6.1.2 (a) dargestellte Würfelnetz, zu dessen Ergänzung – in Abb. 6.1.2 (b) – zwei mögliche Ansichten auf den Würfel mit den jeweiligen Eckpunktbezeichnungen dargestellt sind.

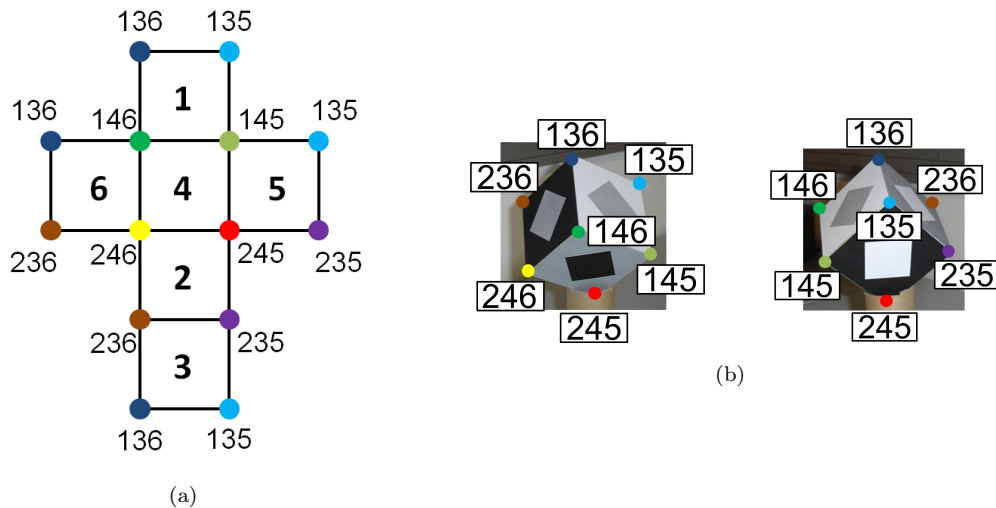


Abb. 6.1.2: Würfeltopologie – (a) Würfelnetz mit Würfeckenkodierung – (b) Mögliche Ansichten des Würfels

Das dargestellte Würfelnetz ist allgemeingültig, d.h. die Ebenen auf dem Würfel sind immer gemäß des definierten topologischen Modells angeordnet. Soll die Ausrichtung des Würfels im Raum ermittelt werden, muss mindestens die Codierung von zwei der drei erfassten Ebenen erkannt und ihre Lage zueinander ermittelt werden.

Die Bestimmung der relativen Lage der einzelnen Ebenen zueinander erfolgt durch die Berechnung der Schwerpunkte der drei Ebenen. Durch ihre Darstellung in Polarkoordinaten gelingt die Beschreibung ihrer Lagebeziehung. Hierzu werden im Folgenden die Lageparameter rechts, links, mittig oben bzw. mittig unten verwendet.

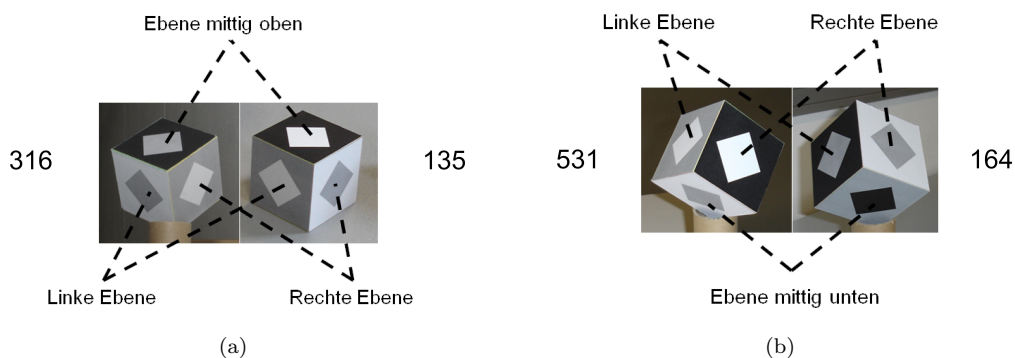


Abb. 6.1.3: Würfelansichten – (a) Ansicht 0 – (b) Ansicht 1

Je nach Sicht des Scanners auf den Würfel liegt die mittige Ebene entweder ober- (Abb. 6.1.3 (a)) oder

unterhalb (Abb. 6.1.3 (b)) der beiden anderen Ebenen. Die beiden Fälle werden unterschieden und für die Implementierung mit Würfelansicht 0 (mittige Ebene oben) und Würfelansicht 1 (mittige Ebene unten) bezeichnet. Die Würfelansicht gibt damit Aufschluss darüber, wie die vom Scannerstandpunkt erfassten Ebenen zueinander angeordnet sind.

Abbildung 6.1.3 zeigt je zwei Beispiele für Ansicht 0 und Ansicht 1 des Würfels, wobei neben den jeweiligen Würfeln die Codierungen ihrer Ebenen angegeben sind. Die Codierung erfolgt dabei stets nach der festgelegten Reihenfolge: Ebene rechts, Ebene links, Ebene mittig.

Einen Überblick aller möglichen benachbarten Ebenen unter Berücksichtigung ihrer Lage zueinander bietet Tab. 6.1.5.

Tab. 6.1.5: *Mögliche Ebenenanordnungen*

Ebene rechts	Ebene links	Ebene mittig	
		oben	unten
Wg (1)	Gw (3)	Sw (5)	Sg (6)
Wg (1)	Gs (4)	Sg (6)	Sw (5)
Wg (1)	Sw (5)	Gs (4)	Gw (3)
Wg (1)	Sg (6)	Gw (3)	Gs (4)
Ws (2)	Gw (3)	Sg (6)	Sw (5)
Ws (2)	Gs (4)	Sw (5)	Sg (6)
Ws (2)	Sw (5)	Gw (3)	Gs (4)
Ws (2)	Sg (6)	Gs (4)	Gw (3)
Gw (3)	Wg (1)	Sg (6)	Sw (5)
Gw (3)	Ws (2)	Sw (5)	Sg (6)
Gw (3)	Sw (5)	Wg (1)	Ws (2)
Gw (3)	Sg (6)	Ws (2)	Wg (1)
Gs (4)	Wg (1)	Sw (5)	Sg (6)
Gs (4)	Ws (2)	Sg (6)	Sw (5)
Gs (4)	Sw (5)	Ws (2)	Wg (1)
Gs (4)	Sg (6)	Wg (1)	Ws (2)
Sw (5)	Wg (1)	Gw (3)	Gs (4)
Sw (5)	Ws (2)	Gs (4)	Gw (3)
Sw (5)	Gw (3)	Ws (2)	Wg (1)
Sw (5)	Gs (4)	Wg (1)	Ws (2)
Sg (6)	Wg (1)	Gs (4)	Gw (3)
Sg (6)	Ws (2)	Gw (3)	Gs (4)
Sg (6)	Gw (3)	Wg (1)	Ws (2)
Sg (6)	Gs (4)	Ws (2)	Wg (1)

Die Gegenüberstellung der Ebenen oben und unten (Tab. 6.1.5 Spalte 3 und 4) verdeutlicht, dass die Forderung nach sich gegenüberliegenden Ebenen mit gleicher Grundflächenfarbe erfüllt ist. Für das obige Beispiel bei Würfelansicht 0 (Abb. 6.1.3 (a)) ergeben sich als verdeckte Ebenen mittig unten: Sw (5) bei Würfel 316 (links) und Sg (6) bei Würfel 135 (rechts). Das Beispiel zeigt die Eindeutigkeit des topologischen Modells:

- Bei der Lage von Gw (3) rechts und Wg (1) links, muss Sg (6) oben und Sw (5) unten liegen.

- Im umgekehrten Fall, bei Lage von Wg (1) rechts und Gw (3) links, befindet sich Sw (5) oben und Sg (6) unten.

Gelingt es, die relative Lage zweier Ebenen und ihre Codierung zu ermitteln, können die restlichen vier Ebenen in ihrer Codierung ebenfalls eindeutig bestimmt werden. Aus den Codierungen zur Beschreibung der Würfelansicht, der Lage der Ebenen zueinander und der Ebenencodierung wird im Folgenden ein zusammengesetzter dreistelliger Code abgeleitet. Dieser sogenannte LG-Code ist für jede Ebene eindeutig und wird verwendet, um die Ebenen des Würfels gezielter ansprechen zu können (vgl. Kap. 7.3). Der LG-Code spezifiziert die Lage und die Grauwerte einer Ebene unter Berücksichtigung der Würfelansicht. Seine allgemeine Beschreibung ist Abb. 6.1.4, Beispiele der Abb. 6.1.5 zu entnehmen. Eine Übersicht der möglichen LG-Codes ist im Anhang in Tab. A.5 zu finden.

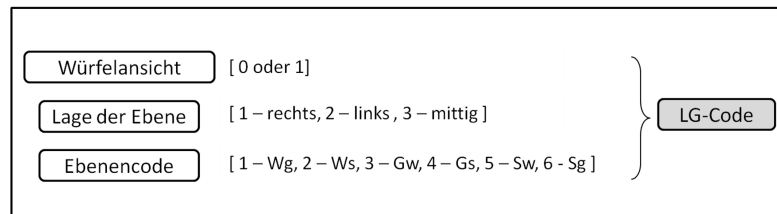


Abb. 6.1.4: *LG-Code*

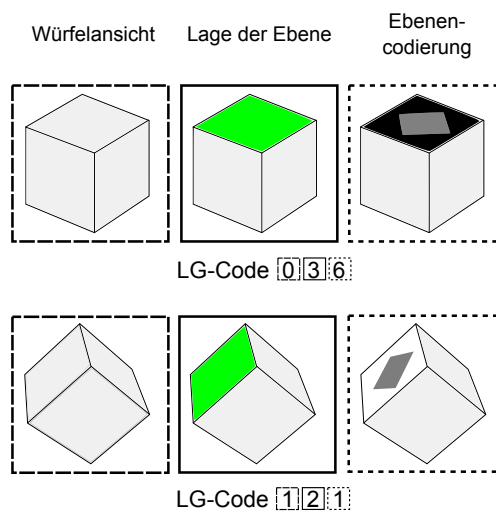


Abb. 6.1.5: *Codierung der Ebene unter Berücksichtigung der Ansicht des Würfels*

6.2 Geometrische Modellierung

6.2.1 Modellierung der Ebenen

Ebenen lassen sich allgemein mit Hilfe der Komponentendarstellung oder der Vektordarstellung formulieren:

$$n_x \cdot x + n_y \cdot y + n_z \cdot z + D = 0 \quad (6.2.1)$$

$$\vec{n} \cdot \vec{x} + D = 0 \quad (6.2.2)$$

Der Parameter D beschreibt den Abstand der Ebene vom Koordinatenursprung, \vec{n} den Normalenvektor, der senkrecht auf der Ebene steht. Seine einzelnen Komponenten n_x , n_y und n_z lassen sich mit Hilfe der Richtungskosinus ausdrücken und stellen die Projektion des Normalenvektors auf die jeweilige Koordinatenachse dar. α , β und γ repräsentieren die mit den Koordinatenachsen (x-, y-, z-Achse) eingeschlossenen Winkel, die Vektoren \vec{e}_x , \vec{e}_y und \vec{e}_z sind die Einheitsvektoren.

$$\cos \alpha = \frac{n_x}{\sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2}} \quad \Rightarrow \quad n_x = \frac{\vec{n} \cdot \vec{e}_x}{|\vec{e}_x|} = |\vec{n}| \cdot \cos \alpha \quad (6.2.3)$$

$$\cos \beta = \frac{n_y}{\sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2}} \quad \Rightarrow \quad n_y = \frac{\vec{n} \cdot \vec{e}_y}{|\vec{e}_y|} = |\vec{n}| \cdot \cos \beta \quad (6.2.4)$$

$$\cos \gamma = \frac{n_z}{\sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2}} \quad \Rightarrow \quad n_z = \frac{\vec{n} \cdot \vec{e}_z}{|\vec{e}_z|} = |\vec{n}| \cdot \cos \gamma \quad (6.2.5)$$

Für eine Ebene, die näherungsweise parallel zur horizontalen Ebene des Scanners liegt, ergeben sich damit in etwa die Werte $\alpha = 90^\circ$, $\beta = 90^\circ$ und $\gamma = 0^\circ$.

Eine alternative Darstellung ist mit der Hesseschen Normalform möglich, die den Normaleneinheitsvektor \vec{n}_0 und den Abstand der Ebene zum Koordinatenursprung d berücksichtigt.

$$x \cdot \cos \alpha + y \cdot \cos \beta + z \cdot \cos \gamma - d = 0 \quad (6.2.6)$$

$$\vec{n}_0 \cdot \vec{x} - d = 0 \quad \text{mit} \quad |\vec{n}_0| = \sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2} = 1 \quad (6.2.7)$$

Die Hessesche Normalform ergibt sich aus Gleichung 6.2.1 durch Multiplikation mit dem Normierungsfaktor μ .

$$\mu = \frac{1}{|\vec{n}|} = \pm \frac{1}{\sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2}} \quad (6.2.8)$$

Das Vorzeichen von μ muss entgegengesetzt von D gewählt werden. Des Weiteren ist $d = -\frac{D}{|\vec{n}|}$. Aus Gleichung 6.2.8 wird deutlich, dass im Allgemeinen zwei Hessesche Normalformen existieren.

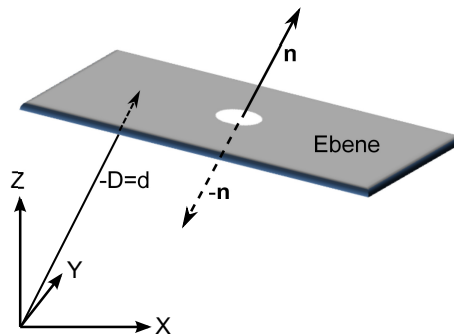


Abb. 6.2.1: Normalenvektor und Ebenenabstand

Nach [MW99] wird $d \geq 0$ gewählt. In diesem Fall ist der Normalenvektor so definiert, dass er vom Koordinatenursprung zur Ebene zeigt. Die zur Ausgleichung verwendete Normalform der Ebene ergibt sich damit zu:

$$n_x \cdot x + n_y \cdot y + n_z \cdot z - d = 0 \quad (6.2.9)$$

Als Ergebnis der Ausgleichung wird damit der normierte Normalenvektor $|\vec{n}_0| = 1$ sowie der Abstand der Ebene vom Koordinatenursprung d erhalten.

6.2.2 Modellierung der Kanten

Die Kanten des Würfels lassen sich durch den Schnitt zweier benachbarter Ebenen berechnen. Die Parameterdarstellung der Kante entspricht dabei der allgemeinen Darstellung für eine Gerade g .

$$g : \quad \vec{x}_S + t \cdot \begin{pmatrix} n_{1x} \\ n_{1y} \\ n_{1z} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} n_{2x} \\ n_{2y} \\ n_{2z} \end{pmatrix} \quad (6.2.10)$$

Der Richtungsvektor der Kante wird durch das Vektorprodukt der Normalenvektoren der beiden sich schneidenden Ebenen repräsentiert.

Für die Beschreibung der Kante wird zudem der Aufpunkt $\vec{x}_S = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$ benötigt, der die beiden Ebenengleichungen der benachbarten Ebenen erfüllen muss.

$$\begin{aligned} n_{1x} \cdot x_1 + n_{1y} \cdot y_1 + n_{1z} \cdot z_1 &= d_1 \\ n_{2x} \cdot x_2 + n_{2y} \cdot y_2 + n_{2z} \cdot z_2 &= d_2 \end{aligned}$$

Mit $x_1 = x_2 = x$, $y_1 = y_2 = y$, $z_1 = z_2 = z$ und nach dem Aufpunkt \vec{x}_S aufgelöst, lautet das zu lösende Gleichungssystem

$$\vec{x}_S = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} n_{1x} & n_{1y} & n_{1z} \\ n_{2x} & n_{2y} & n_{2z} \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \end{pmatrix} \quad (6.2.11)$$

Für dieses unterbestimmte Gleichungssystem mit den drei Unbekannten x, y, z , aber lediglich zwei Beobachtungsgleichungen, existieren im Allgemeinen entweder keine oder unendlich viele Lösungen. Da die beiden Ebenen nicht parallel sind, müssen sie sich schneiden, woraus eine unendliche Lösungsmenge, in Form der gesuchten Kante, entsteht.

6.2.3 Modellierung der Eckpunkte

Werden die Normalenvektoren dreier benachbarter Ebenen zum Schnitt gebracht, lassen sich die Koordinaten des Eckpunktes mit Hilfe der Gleichung (6.2.13) berechnen, wobei Δ die Determinante sowie Δx , Δy , und Δz Unterdeterminanten darstellen.

In Anlehnung an [BSMM08] lässt sich der Schnittpunkt x, y, z dreier Ebenen, gegeben durch

$$\begin{aligned} n_{1x}x + n_{1y}y + n_{1z}z &= d_1 \\ n_{2x}x + n_{2y}y + n_{2z}z &= d_2 \\ n_{3x}x + n_{3y}y + n_{3z}z &= d_3 \end{aligned} \quad (6.2.12)$$

mit Hilfe der Determinanten Δ nach den Formeln:

$$x = E_{1_x} = \frac{\Delta x}{\Delta} \quad y = E_{1_y} = \frac{\Delta y}{\Delta} \quad z = E_{1_z} = \frac{\Delta z}{\Delta} \quad (6.2.13)$$

mit

$$\Delta = \begin{vmatrix} n_{1_x} & n_{1_y} & n_{1_z} \\ n_{2_x} & n_{2_y} & n_{2_z} \\ n_{3_x} & n_{3_y} & n_{3_z} \end{vmatrix} \quad \Delta x = \begin{vmatrix} d_1 & n_{1_y} & n_{1_z} \\ d_2 & n_{2_y} & n_{2_z} \\ d_3 & n_{3_y} & n_{3_z} \end{vmatrix} \quad \Delta y = \begin{vmatrix} n_{1_x} & d_1 & n_{1_z} \\ n_{2_x} & d_2 & n_{2_z} \\ n_{3_x} & d_3 & n_{3_z} \end{vmatrix} \quad \Delta z = \begin{vmatrix} n_{1_x} & n_{1_y} & d_1 \\ n_{2_x} & n_{2_y} & d_2 \\ n_{3_x} & n_{3_y} & d_3 \end{vmatrix}$$

berechnen, wobei an dieser Stelle Gleichung (6.2.9) zugrunde gelegt wird.

Der Schnittpunkt repräsentiert den ersten Eckpunkt E_1 , weshalb seine Komponenten mit E_{1_x} , E_{1_y} , E_{1_z} bezeichnet werden. Die Variablen n_1 , n_2 , n_3 stellen die Normalenvektoren, d_1 , d_2 , d_3 die Abstände der Ebenen vom Koordinatenursprung dar.

Ausgehend vom ersten Eckpunkt erfolgt die Bestimmung der weiteren Eckpunkte. Hierzu werden die normierten Richtungsvektoren \vec{k}_i der Kanten des Würfels sowie die Kantenlänge k_l benötigt. Die Richtungsvektoren \vec{k}_i der Kanten lassen sich gemäß Gleichung 6.2.14 ermitteln, wobei die Annahme getroffen wird, dass jeweils vier Kanten des Würfels parallel sind.

$$\begin{aligned} \vec{k}_1 &= \frac{\vec{n}_1 \times \vec{n}_2}{|\vec{n}_1 \times \vec{n}_2|} = \overline{E_1 E_2} = \overline{E_3 E_7} = \overline{E_4 E_6} = \overline{E_5 E_8} \\ \vec{k}_2 &= \frac{\vec{n}_1 \times \vec{n}_3}{|\vec{n}_1 \times \vec{n}_3|} = \overline{E_1 E_3} = \overline{E_2 E_7} = \overline{E_4 E_5} = \overline{E_6 E_8} \\ \vec{k}_3 &= \frac{\vec{n}_2 \times \vec{n}_3}{|\vec{n}_2 \times \vec{n}_3|} = \overline{E_1 E_4} = \overline{E_2 E_6} = \overline{E_3 E_5} = \overline{E_7 E_8} \end{aligned} \quad (6.2.14)$$

Mit Hilfe der festgelegten Kantenlänge k_l lassen sich die Eckpunkte E_2 , E_3 und E_4 in der folgenden Weise berechnen:

$$\begin{aligned} E_2 &= E_1 + k_l \cdot \vec{k}_1 = E_1 + k_l \frac{\vec{n}_1 \times \vec{n}_2}{|\vec{n}_1 \times \vec{n}_2|} \\ E_3 &= E_1 + k_l \cdot \vec{k}_2 = E_1 + k_l \frac{\vec{n}_1 \times \vec{n}_3}{|\vec{n}_1 \times \vec{n}_3|} \\ E_4 &= E_1 + k_l \cdot \vec{k}_3 = E_1 + k_l \frac{\vec{n}_2 \times \vec{n}_3}{|\vec{n}_2 \times \vec{n}_3|} \end{aligned} \quad (6.2.15)$$

Um zu bestimmen, in welche Richtung die Kante – ausgehend von Eckpunkt 1 – verläuft, werden zwei potentielle Eckpunkte bestimmt. Der Eckpunkt, dessen Abstand zum Schwerpunkt der Nachbarfläche geringer ist, stellt den gesuchten Eckpunkt dar. Dieser Sachverhalt wird in Abb. 6.2.2 verdeutlicht. Ausgehend von Startpunkt E_1 wird die Kantenlänge k_l in beide möglichen Richtungen abgesetzt, wodurch sich die möglichen Eckpunkte E_{2a} und E_{2b} ergeben. Da der Abstand von E_{2a} zum Schwerpunkt S der benachbarten Ebene geringer ist als der von E_{2b} zu S , handelt es sich bei E_{2a} um den gesuchten Eckpunkt.

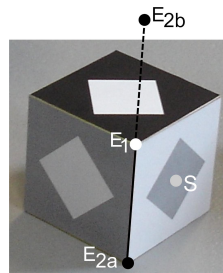
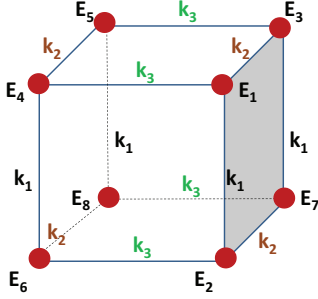


Abb. 6.2.2: Bestimmung der Richtung des Kantenverlaufs

Die Eckpunkte E_5 - E_8 werden durch den Schnitt zweier Kanten berechnet. Diese Kanten verlaufen parallel zu den bereits zuvor bestimmten Kanten. Ausgangspunkte bilden jeweils zwei sich auf einer Würfelebene diagonal gegenüberliegende Eckpunkte. In Abb. 6.2.3 ist das Kantenmodell des Würfels schematisch dargestellt.



$$\begin{aligned}
 E_5 &= E_3 + k_l \cdot \vec{k}_3 = E_4 + k_l \cdot \vec{k}_2 = E_1 + k_l(\vec{k}_2 + \vec{k}_3) \\
 E_6 &= E_4 + k_l \cdot \vec{k}_1 = E_2 + k_l \cdot \vec{k}_3 = E_1 + k_l(\vec{k}_1 + \vec{k}_3) \\
 E_7 &= E_3 + k_l \cdot \vec{k}_1 = E_2 + k_l \cdot \vec{k}_2 = E_1 + k_l(\vec{k}_1 + \vec{k}_2) \\
 E_8 &= E_6 + k_l \cdot \vec{k}_2 = E_7 + k_l \cdot \vec{k}_3 = E_1 + k_l(\vec{k}_1 + \vec{k}_2 + \vec{k}_3)
 \end{aligned}
 \tag{6.2.16}$$

Abb. 6.2.3: Modellierung der Kanten und Eckpunkte

6.3 Fehlerbudget

6.3.1 Bestimmung der Varianzen der Eckpunkte

Es existiert eine Vielzahl von Einflussfaktoren, welche auf die Genauigkeit der Eckpunktbestimmung einwirken. In erster Linie sind dies Einflüsse, die durch den spezifischen Laserscanner und die spezielle Aufnahmekonfiguration verursacht werden. Des Weiteren spielt die Fertigungsgenauigkeit des Würfels eine große Rolle.

Die Untersuchungen in Kap. 5.3.2 haben gezeigt, dass die industriell gefertigten Würfel eine hohe Fertigungsgenauigkeit aufweisen. Die nachfolgenden Betrachtungen sollen die Auswirkungen auf die Varianzen der Eckpunkte unter Annahme einer geringeren Fertigungsgenauigkeit sowie den Einfluss der Ebenenausrichtung zeigen. Hierzu wird eine Standardabweichung der Kantenlänge $s_{kl} = \pm 1\text{mm}$ verwendet.

Um eine Aussage über das Genauigkeitspotenzial der Würfeleckenpunkte treffen zu können, kommt das Varianzfortpflanzungsgesetz zum Einsatz. Hierbei wird die Zielfunktion nach ihren Variablen partiell abgeleitet. Die Variablen stellen dabei die Messgrößen dar, die mit den Varianzen σ_j^2 behaftet sind ([WS00]). Als Varianzen dienen die während der Ebenenausgleichung ermittelten Fehlerwerte für die einzelnen Komponenten der Normalenvektoren sowie des Parameters d . Diese sollen im Folgenden mit nf_{1_x} , nf_{1_y} , nf_{1_z} , nf_{2_x} , nf_{2_y} , nf_{2_z} , nf_{3_x} , nf_{3_y} , nf_{3_z} und df_1 , df_2 , df_3 bezeichnet werden.

Die Bestimmung der Varianzen des Eckpunktes E_1 erfolgt gemäß Gleichung (6.3.1).

Für die x-Komponente E_{1_x} ergibt sich:

$$\begin{aligned}
 f_{E_{1_x}}^2 &= \left(\frac{\partial E_{1_x}}{\partial n_{1_x}} \right)^2 nf_{1_x}^2 + \left(\frac{\partial E_{1_x}}{\partial n_{1_y}} \right)^2 nf_{1_y}^2 + \left(\frac{\partial E_{1_x}}{\partial n_{1_z}} \right)^2 nf_{1_z}^2 + \left(\frac{\partial E_{1_x}}{\partial d_1} \right)^2 df_1^2 \\
 &+ \left(\frac{\partial E_{1_x}}{\partial n_{2_x}} \right)^2 nf_{2_x}^2 + \left(\frac{\partial E_{1_x}}{\partial n_{2_y}} \right)^2 nf_{2_y}^2 + \left(\frac{\partial E_{1_x}}{\partial n_{2_z}} \right)^2 nf_{2_z}^2 + \left(\frac{\partial E_{1_x}}{\partial d_2} \right)^2 df_2^2 \\
 &+ \left(\frac{\partial E_{1_x}}{\partial n_{3_x}} \right)^2 nf_{3_x}^2 + \left(\frac{\partial E_{1_x}}{\partial n_{3_y}} \right)^2 nf_{3_y}^2 + \left(\frac{\partial E_{1_x}}{\partial n_{3_z}} \right)^2 nf_{3_z}^2 + \left(\frac{\partial E_{1_x}}{\partial d_3} \right)^2 df_3^2
 \end{aligned}
 \tag{6.3.1}$$

Analog erfolgt die Berechnung der Varianzen für die y- und die z-Komponente. Der mittlere Punktfehler s_{E_1} für den Eckpunkt E_1 setzt sich schließlich aus seinen Einzelkomponenten $f_{E_{1_x}}$, $f_{E_{1_y}}$ und $f_{E_{1_z}}$

zusammen:

$$s_{E_1} = \sqrt{f_{E_{1x}}^2 + f_{E_{1y}}^2 + f_{E_{1z}}^2} \quad (6.3.2)$$

Für die Eckpunkte E_2 - E_4 und E_5 - E_8 werden die partiellen Ableitungen der Gleichungen (6.2.15) bzw. (6.2.16) gebildet und ebenfalls die Varianzen gemäß des Varianzfortpflanzungsgesetzes ermittelt.

Die Gleichung (6.3.3) zeigt beispielhaft die Varianz der x-Komponente des Eckpunktes E_2 .

$$\begin{aligned} f_{E_{2x}}^2 &= \left(\frac{\partial E_{2x}}{\partial E_1} \right)^2 s_{E_1}^2 + \left(\frac{\partial E_{2x}}{\partial k_l} \right)^2 s_{kl}^2 \\ &+ \left(\frac{\partial E_{2x}}{\partial n_{1x}} \right)^2 n_{f_{1x}}^2 + \left(\frac{\partial E_{2x}}{\partial n_{1y}} \right)^2 n_{f_{1y}}^2 + \left(\frac{\partial E_{2x}}{\partial n_{1z}} \right)^2 n_{f_{1z}}^2 \\ &+ \left(\frac{\partial E_{2x}}{\partial n_{2x}} \right)^2 n_{f_{2x}}^2 + \left(\frac{\partial E_{2x}}{\partial n_{2y}} \right)^2 n_{f_{2y}}^2 + \left(\frac{\partial E_{2x}}{\partial n_{2z}} \right)^2 n_{f_{2z}}^2 \end{aligned} \quad (6.3.3)$$

Es wird deutlich, dass die Standardabweichung der Kantenlänge s_{kl} in die Bestimmung der Varianzen der Eckpunkte E_2 - E_8 einfließt.

Tab. 6.3.1 zeigt beispielhaft eine zur Fehlerberechnung verwendete Eingabedatei. Hierbei sind die ermittelten Komponenten der Normalenvektoren der drei Ebenen sowie die Abstände der Ebenen vom Ursprung mit ihren ermittelten Fehlerwerten dargestellt.

Tab. 6.3.1: Eingabedatei für die Fehlerberechnung

Ebene	Ebenenparameter			
	$\mathbf{n}_x \pm \mathbf{n}f_x$	$\mathbf{n}_y \pm \mathbf{n}f_y$	$\mathbf{n}_z \pm \mathbf{n}f_z$	$\mathbf{d} \pm \mathbf{d}_f$ [m]
1	0.9727 ± 0.0001	0.2319 ± 0.0004	0.0095 ± 0.0003	-0.0456 ± 0.0000
2	0.2339 ± 0.0001	-0.9722 ± 0.0000	-0.0049 ± 0.0001	-0.0155 ± 0.0000
3	0.0067 ± 0.0004	-0.0028 ± 0.0004	1.0000 ± 0.0000	0.0394 ± 0.0000

Gemäß der Gleichungen (6.2.3)-(6.2.5) lassen sich die Komponenten des Normalenvektors mit Hilfe des Richtungskosinus ausdrücken. Es ergeben sich dabei zwei mögliche Winkelwerte für α , β und γ , da gilt: $\cos x = \cos(2\pi - x)$.

Die Winkelabweichungen der Komponenten des Normalenvektors können mit den Gleichungen (6.3.4) - (6.3.6) ermittelt werden und bieten eine anschaulichere Darstellung der Fehlerkomponenten in Tab. 6.3.2. Abb. 6.3.1 veranschaulicht schematisch die Lage der Komponenten der Normalenvektoren im lokalen Scannerkoordinatensystem. Das lokale Koordinatensystem wird dabei jeweils in den Schwerpunkt der einzelnen Ebenen verlegt.

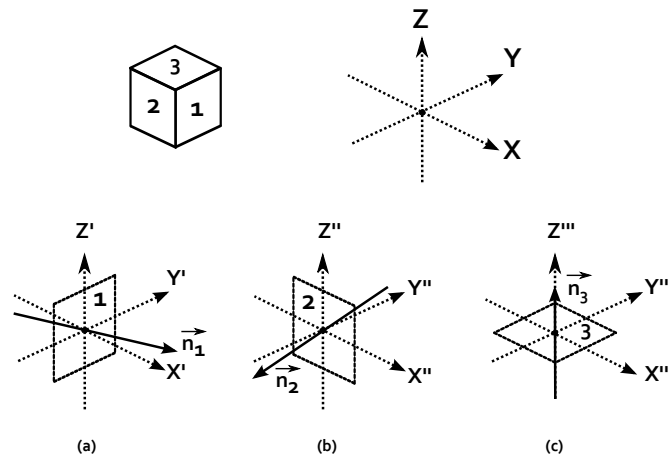
$$nf_x[\text{rad}] = \alpha - \alpha_f \quad \text{mit} \quad \alpha = \arccos\left(\frac{n_x}{\sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2}}\right), \quad \alpha_f = \arccos\left(\frac{n_x \pm nf_x}{\sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2}}\right) \quad (6.3.4)$$

$$nf_y[\text{rad}] = \beta - \beta_f \quad \text{mit} \quad \beta = \arccos\left(\frac{n_y}{\sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2}}\right), \quad \beta_f = \arccos\left(\frac{n_y \pm nf_y}{\sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2}}\right) \quad (6.3.5)$$

$$nf_z[\text{rad}] = \gamma - \gamma_f \quad \text{mit} \quad \gamma = \arccos\left(\frac{n_z}{\sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2}}\right), \quad \gamma_f = \arccos\left(\frac{n_z \pm nf_z}{\sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2}}\right) \quad (6.3.6)$$

Tab. 6.3.2: Normalenvektorkomponenten mit Fehlerangaben in Altgrad

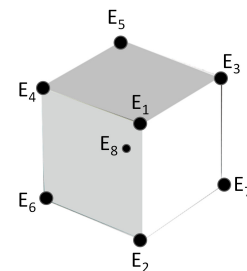
Ebene	Ebenenparameter		
	$n_x [^\circ] \pm nf_x [^\circ]$	$n_y [^\circ] \pm nf_y [^\circ]$	$n_z [^\circ] \pm nf_z [^\circ]$
1	13.418 ± 0.021	76.594 ± 0.021	89.455 ± 0.020
2	76.473 ± 0.003	166.530 ± 0.003	90.282 ± 0.003
3	89.618 ± 0.025	90.158 ± 0.025	0.413 ± 0.025

**Abb. 6.3.1:** Darstellung der Normalenvektoren im lokalen Scannerkoordinatensystem – oben: Würfel und lokales Scannerkoordinatensystem – unten: Verschiebung des Scannerkoordinatensystems in den Schwerpunkt – (a) der Ebene 1 – (b) der Ebene 2 – (c) der Ebene 3

Bei Annahme einer maximalen Standardabweichung der Kantenlänge $s_{kl} = 1\text{mm}$ ergeben sich für die Eckpunkte des auf dem Boden gelagerten Würfels (Abb. 6.3.2) die nachfolgend in Tab. 6.3.3 dargestellten Fehlerwerte f_{ges} .

Tab. 6.3.3: Ermittelte Punktfehler I

	$f_x [\text{mm}]$	$f_y [\text{mm}]$	$f_z [\text{mm}]$	$f_{ges} [\text{mm}]$
E₁	0.02	0.01	0.03	0.03
E₂	0.04	0.01	1.00	1.00
E₃	0.24	0.97	0.05	1.00
E₄	0.97	0.23	0.05	1.00
E₅	0.74	1.21	0.07	1.42
E₆	0.96	0.23	1.00	1.40
E₇	0.25	0.97	1.01	1.42
E₈	0.73	1.20	1.00	1.73

**Abb. 6.3.2:** Schematische Darstellung der Würfeckpunkte

Die Bestimmungsgenauigkeiten der Eckpunkte lassen sich danach in vier Gruppen einteilen:

- E_1 : weist erwartungsgemäß den geringsten Fehler auf, da nur die Fehler der Normalenvektoren und die Abstände der drei Ebenen vom Ursprung in die Berechnung eingehen. Die Standardabweichung der Kantenlänge hat keinen Einfluss.
- E_2 - E_4 : es fließt zusätzlich die Unsicherheit einer Kante in die Bestimmung der Varianz ein.
- E_5 - E_7 : zwei Kanten haben Einfluss auf die Varianz.
- E_8 : drei Kanten haben Einfluss auf die Varianz des Eckpunktes.

Die Standardabweichung der Kantenlänge stellt damit den größten Fehleranteil dar. Mit $s_{kl} = 1\text{mm}$ ist sie entsprechend hoch gewählt, um einen Maximalfehler für die Eckpunkte abschätzen zu können. Eine Gegenüberstellung der Eckpunktfehler bei geringerer Standardabweichung folgt im nachfolgenden Kapitel, ebenso die Betrachtung der Fehler der einzelnen Komponenten der Eckpunkte E_{fx} , E_{fy} , E_{fz} .

6.3.2 Bestimmung der Eckpunktgenauigkeit bei unterschiedlichen Fertigungstoleranzen

Den Einfluss unterschiedlicher Standardabweichungen der Kantenlänge auf die Punktfehler der Eckpunkte E_1 - E_8 zeigt Abb. 6.3.3. Hierbei zeigt sich bei allen vier unterschiedlich gewählten Werten für s_{kl} die zuvor beschriebene Gruppierung der Eckpunkte anhand ihrer Varianzen, und es gilt näherungsweise:

- $f_{E_2} \approx f_{E_3} \approx f_{E_4} \approx \sqrt{s_{kl}^2}$
- $f_{E_5} \approx f_{E_6} \approx f_{E_7} \approx \sqrt{2 \cdot s_{kl}^2}$
- $f_{E_8} \approx \sqrt{3 \cdot s_{kl}^2}$

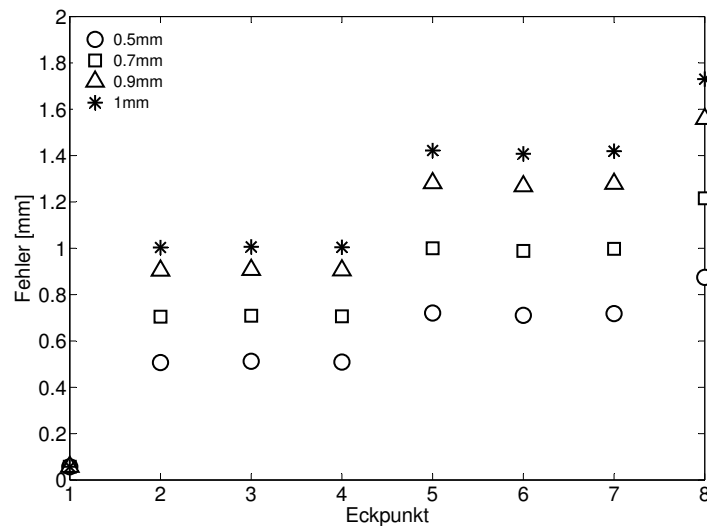


Abb. 6.3.3: Eckpunktfehler bei unterschiedlichen Fertigungstoleranzen

Werden die Fehleranteile in ihre einzelnen Komponenten E_{fx} , E_{fy} , E_{fz} zerlegt, weisen die einzelnen Eckpunkte sehr unterschiedliche Ergebnisse auf (Tab. 6.3.3 und Abb. 6.3.4 - 6.3.6).

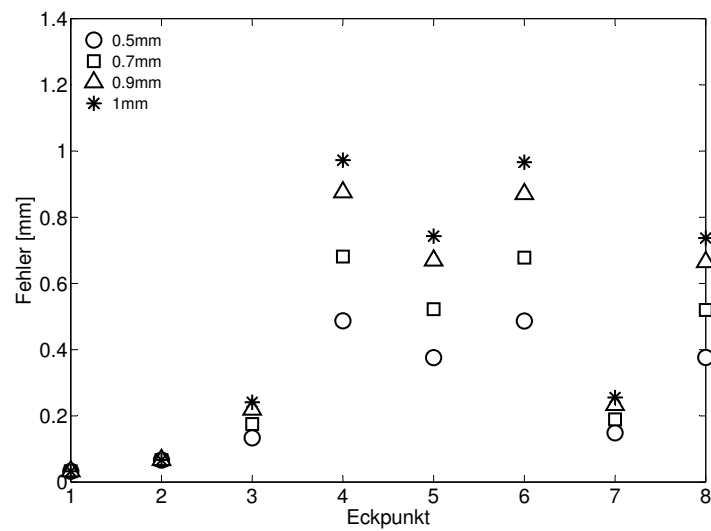


Abb. 6.3.4: Fehler der x-Koordinate der Eckpunkte $E_1 - E_8$ bei unterschiedlichen Fertigungstoleranzen

Die größten Fehlerwerte in den x-Koordinaten treten im obigen Beispiel bei den Eckpunkten E_4 und E_6 , in den y-Koordinaten bei den Eckpunkten E_5 und E_8 auf.

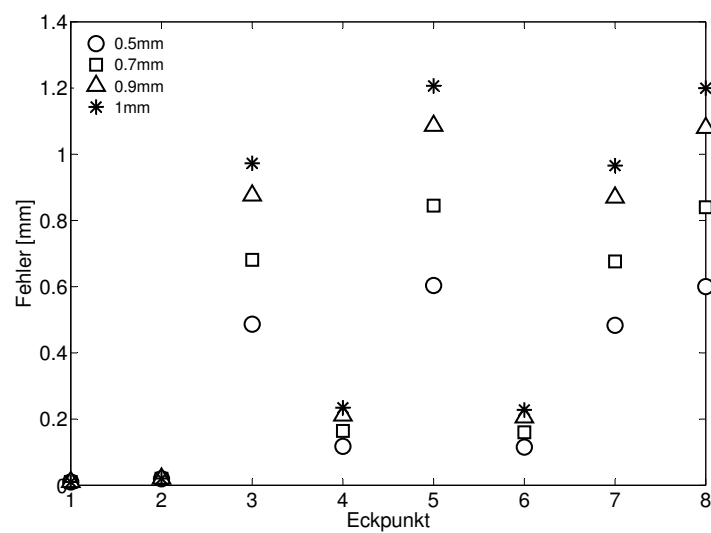


Abb. 6.3.5: Fehler der y-Koordinate der Eckpunkte $E_1 - E_8$ bei unterschiedlichen Fertigungstoleranzen

Insgesamt zeigt sich bei allen drei Komponenten, dass jeweils zwei Eckpunkte nahezu identische Fehlerwerte aufweisen.

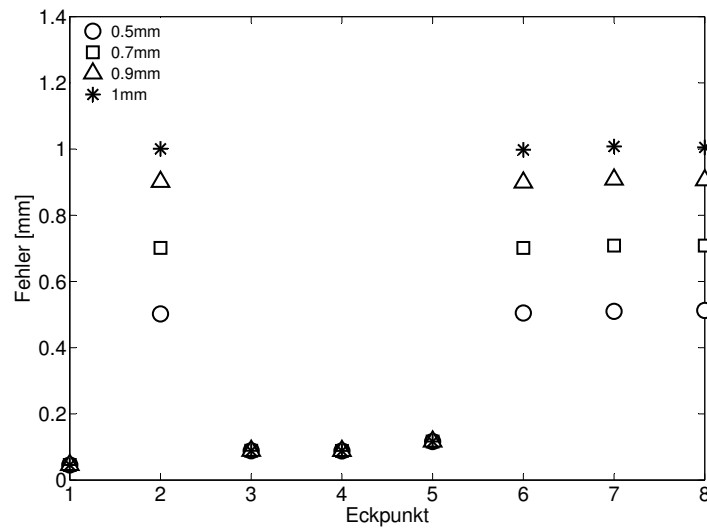


Abb. 6.3.6: Fehler der z-Koordinate der Eckpunkte $E_1 - E_8$ bei unterschiedlichen Fertigungstoleranzen

Die unterschiedlichen Fehlerwerte in den x-, y- und z-Komponenten liegen in der Lage der einzelnen Ebenen begründet. Im Folgenden werden deshalb die Auswirkungen der Fehler der Normalenvektoren in Abhängigkeit von der Ebenenlage am Beispiel der x-Komponente n_x betrachtet.

Den Ausgangspunkt der Betrachtung bilden zwei unterschiedliche Werte: $n_{1x} = 1$ und $n_{2x} = 0$. Als Fehler soll für beide gelten: $dn_1 = dn_2 = 0.1$.

Werden aus den Komponenten die Schnittwinkel mit den Achsen berechnet, ergeben sich die Werte $n_{1x} [^\circ] = 0^\circ$ und $n_{2x} [^\circ] = 90^\circ$. Durch Anwendung der Gleichung (6.3.4) lassen sich die Fehler der x-Komponenten der Normalenvektoren berechnen, die sich deutlich unterscheiden: $nf_{1x} [^\circ] \approx 26^\circ$ und $nf_{2x} [^\circ] \approx 6^\circ$. Die Ursache hierfür liegt in den Eigenschaften der Kosinusfunktion begründet (Abb. 6.3.7).

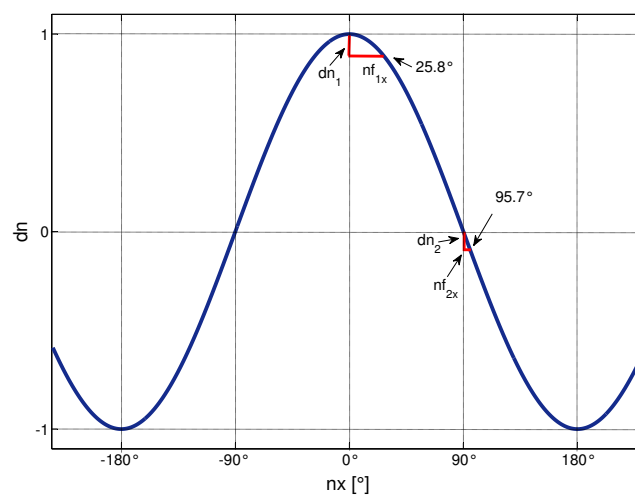


Abb. 6.3.7: Einfluss der Fehler auf die Achsenschnittwinkel

Die größten Fehlereinflüsse ergeben sich in zwei Fällen:

- a) $0^\circ \leq n_x [^\circ] \leq 90^\circ$ und $n_x [^\circ]$ besitzt einen kleinen Winkelwert.
- b) $90^\circ < n_x [^\circ] \leq 180^\circ$ und $n_x [^\circ]$ weist einen großen Winkelwert auf.

Analog gilt dies für die y- und z-Komponente des Normalenvektors.

Die Unsicherheiten von $dn_1 = dn_2 = 0.1$ sind im obigen Beispiel zur Veranschaulichung sehr hoch gewählt. Werden die berechneten Winkelunsicherheiten aus den Messwerten herangezogen, ergibt sich im Allgemeinen $dn \leq 0.001$, was bei den gewählten Werten Winkeländerungen von $\approx 2.6^\circ$ bzw. $\approx 0.1^\circ$ ergibt. In einigen Fällen werden höhere Winkelunsicherheiten erhalten. Die Gründe hierfür werden in Kap. 8.1 diskutiert.

Anhand obiger Betrachtungen lassen sich für die Eckpunkte $E_2 - E_4$ die Komponenten mit dem größten Fehlereinfluss bestimmen. Basierend auf Gleichung (6.2.14) gilt:

$$\begin{aligned}\vec{n}_3 = \vec{k}_1 &= \frac{\vec{n}_1 \times \vec{n}_2}{|\vec{n}_1 \times \vec{n}_2|} \\ \vec{n}_2 = \vec{k}_2 &= \frac{\vec{n}_1 \times \vec{n}_3}{|\vec{n}_1 \times \vec{n}_3|} \\ \vec{n}_1 = \vec{k}_3 &= \frac{\vec{n}_2 \times \vec{n}_3}{|\vec{n}_2 \times \vec{n}_3|}\end{aligned}\tag{6.3.7}$$

Der Normalenvektor \vec{n}_3 bildet die Kante \vec{k}_1 , die E_1 mit E_2 verbindet. Aufgrund des geringen Schnittwinkels mit der z-Achse, $n_{z_3} = 0.4^\circ$ (Tab. 6.3.2) ergibt sich der größte Fehlereinfluss für E_{2_z} .

Für E_3 ist die Kante \vec{k}_2 und damit der Normalenvektor \vec{n}_2 , für E_4 die Kante \vec{k}_3 bzw. \vec{n}_1 von Bedeutung. Der größte Fehler ergibt sich für die y-Komponente von E_3 ($n_{y_2} = 166.5^\circ$) und für die x-Komponente von E_4 ($n_{x_1} = 13.5^\circ$). Für die Eckpunkte $E_5 - E_8$ ergeben sich die einzelnen Fehlerkomponenten aus der Kombination ihrer Kanten ausgehend von E_1 , beispielsweise sind für E_6 die Kanten \vec{k}_1 und \vec{k}_3 maßgebend. Befindet sich der Würfel auf dem Adapter (Abb. 6.3.8) werden bezüglich der Gesamtpunktfehler der einzelnen Eckpunkte ähnliche Ergebnisse erhalten wie beim vorherigen Beispiel (s. Tab. 6.3.3).

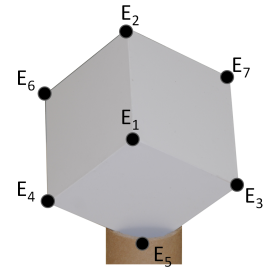
Die zugehörige Eingabedatei für den Würfel auf dem Adapter ist in Tab. 6.3.4 dargestellt. Sie zeigt die Schnittwinkel der Normalenvektorkomponenten mit den Achsen des lokalen Scannerkoordinatensystems und die Abhängigkeit der Komponenteneckpunktfehler von der Ebenenlage. Eckpunkt E_4 weist für seine einzelnen Komponenten $E_{f_{x_4}}$, $E_{f_{y_4}}$, $E_{f_{z_4}}$ aufgrund ähnlicher Schnittwinkel mit den Achsen nahezu identische Komponentenfehler auf (Tab. 6.3.5).

Tab. 6.3.4: Normalenvektorkomponenten mit Fehlerangaben in Altgrad (Würfel auf Adapter)

Ebene	Ebenenparameter		
	$n_x [^\circ] \pm nf_x [^\circ]$	$n_y [^\circ] \pm nf_y [^\circ]$	$n_z [^\circ] \pm nf_z [^\circ]$
1	48.103 ± 0.072	58.766 ± 0.071	57.723 ± 0.073
2	43.887 ± 0.011	70.361 ± 0.011	52.677 ± 0.011
3	82.527 ± 0.009	37.248 ± 0.010	53.763 ± 0.010

Tab. 6.3.5: *Ermittelte Punktfehler II*

	f_x [mm]	f_y [mm]	f_z [mm]	f_{ges} [mm]
E₁	0.05	0.04	0.04	0.08
E₂	0.16	0.79	0.60	1.01
E₃	0.74	0.33	0.60	1.01
E₄	0.68	0.51	0.53	1.00
E₅	0.10	0.83	1.13	1.41
E₆	0.55	1.30	0.10	1.41
E₇	0.87	1.12	0.09	1.42
E₈	0.22	1.62	0.54	1.72

**Abb. 6.3.8:** *Würfeleckenpunkte bei Lagerung auf Adapter*

6.3.3 Kontrollberechnungen

Der Schnittwinkel ϕ zweier Kanten angrenzender Ebenen sollte idealerweise 90° ergeben und lässt sich mit Hilfe des Skalarproduktes überprüfen.

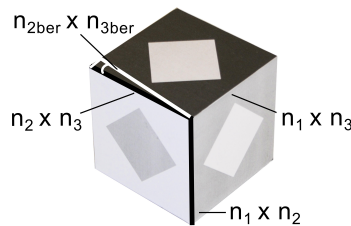
$$\cos \phi = \frac{\vec{n}_1 \cdot \vec{n}_2}{|\vec{n}_1| \cdot |\vec{n}_2|} \quad (6.3.8)$$

Für einen idealen Würfel gilt, dass die Normalenvektoren der Würfebenen senkrecht aufeinander stehen.

$$\vec{n}_1 \times \vec{n}_2 \stackrel{!}{=} \vec{n}_3 \quad (6.3.9)$$

Aufgrund der Messunsicherheiten kommt es jedoch zu Abweichungen vom Sollwert 90° , sodass die Gleichung (6.3.9) nur näherungsweise erfüllt wird. Abb. 6.3.9 veranschaulicht den Zusammenhang anhand der Kante k_3 .

Die theoretische Kante $k_3 = n_2 \times n_3$, die senkrecht auf den theoretischen Kanten $k_1 = n_1 \times n_2$ und $k_2 = n_1 \times n_3$ steht, besitzt eine Winkel- und eine Lageabweichung zu der aus Berechnungswerten ermittelten Kante $k_{3ber} = n_{2ber} \times n_{3ber}$.

**Abb. 6.3.9:** *Abweichung vom Sollwinkel*

Um die Abweichung vom Sollwert zu bestimmen, erfolgt die Berechnung des Vektorproduktes jeweils zweier Normalenvektoren und die Bildung des jeweiligen Skalarproduktes.

Für das obige Beispiel werden demnach die Vektorprodukte $n_1 \times n_2$ und $n_1 \times n_3$ bestimmt und das Skalarprodukt berechnet. Tab. 6.3.6 veranschaulicht eine beispielhafte Berechnung für einen gescannten Würfel.

Tab. 6.3.6: *Schnittwinkel zwischen den berechneten Kanten*

Kante	Schnittwinkel [°]	Abweichungen	
		[°]	[mm]
$n_2 \times n_3 \triangleleft n_1 \times n_3 \rightarrow$ $n_1 \triangleleft n_2$	90.34	0.34	0.59
$n_2 \times n_3 \triangleleft n_1 \times n_2 \rightarrow$ $n_1 \triangleleft n_3$	90.22	0.22	0.38
$n_1 \times n_3 \triangleleft n_1 \times n_2 \rightarrow$ $n_2 \triangleleft n_3$	89.84	-0.16	-0.27

Hierbei zeigen sich Abweichungen in den Schnittwinkeln von bis zu $\pm 0.34^\circ$. Bezogen auf die Kantenlänge $k_l = 100$ mm entspricht dies einer Lageabweichung von ca. ± 0.6 mm.

Der Schnittwinkel der Normalenvektoren gibt Aufschluss darüber, wie exakt der jeweilige Würfel erfasst werden konnte bzw. wie exakt er schließlich modelliert werden kann. Im obigen Beispiel liegen die Ergebnisse etwas über den ermittelten Werten der mittleren Winkelabweichung $w_{m_g} = 0.08^\circ$ (vgl. Kap. 5.3.2). Auswertungen von mehr als 50 Würfeln in unterschiedlichen Entfernungen haben gezeigt, dass diese Ergebnisse nicht immer erreicht werden können. In einigen Fällen wurden Winkeldifferenzen von $\pm 3^\circ$ bzw. ± 5 mm (bezogen auf die Kantenlänge $k_l = 100$ mm) beobachtet. Diese liegen deutlich über der spezifizierten Fertigungstoleranz und weisen auf Probleme bei der Ebenenbestimmung hin.

Folgende Ursachen können hierfür genannt werden (vgl. Kap. 8.1):

- Der Würfel wird bei großem Abstand gescannt und eine oder mehrere Ebenen können nur mit geringer Punktzahl erfasst werden.
- Ein hoher Auftreffwinkel des Laserstrahls auf eine Ebene sorgt für ein höheres Messrauschen und damit für eine unsichere Bestimmung der Ebenenparameter.

Durch die Ermittlung der Schnittwinkel der Normalenvektoren lassen sich zugleich die Abweichungen von der Sollgeometrie des Würfels bestimmen, indem die Flächen- und Raumdiagonalen berechnet und den theoretischen Werten gegenübergestellt werden.

Die Sollängen der Flächen- (f_l) und Raumdiagonalen (r_l) lassen sich mit Hilfe der Kantenlänge k_l bestimmen:

$$f_l = \sqrt{2 \cdot k_l^2} \quad r_l = \sqrt{3 \cdot k_l^2} \quad (6.3.10)$$

Für die spätere Berechnung der Würfeckpunkte wird für die Kantenlänge $k_l = \text{const.}$ angenommen, sodass gemäß des vorgestellten Prototypen jede Kante eine Länge von $k_l = 100$ mm besitzt. Da der Schnittwinkel zwischen den Ebenen nicht exakt 90° beträgt, weisen die berechneten Flächen- und Raumdiagonalen Abweichungen zu ihren Sollängen auf.

Für die Abweichungen der Flächendiagonalen df_{l1} und df_{l2} gilt:

$$df_{l1} = f_l - f_{l_{b1}} \quad df_{l2} = f_l - f_{l_{b2}} \quad (6.3.11)$$

mit

$$f_{l_{b1}} = \sqrt{2 \cdot k_l^2 - 2 \cdot k_l \cdot k_l \cdot \cos \alpha_s}$$

$$f_{l_{b2}} = \sqrt{2 \cdot k_l^2 + 2 \cdot k_l \cdot k_l \cdot \cos \alpha_s} \quad (6.3.12)$$

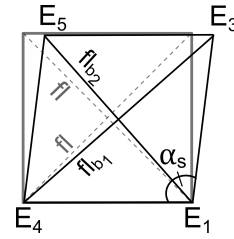


Abb. 6.3.10: Schematische Darstellung der Flächendiagonalen

Zur endgültigen Prüfung der Würfelgeometrie lassen sich die Abweichungen aller Flächen- und Raumdiagonalen des Würfels berechnen (Tab. 6.3.7).

Tab. 6.3.7: Kontrolle der Strecken zwischen den Eckpunkten

Eckpunkt E ₁	Eckpunkt E ₂	$S_s = E_1 - E_2$ [mm]	$S_b = E_{1_b} - E_{2_b}$ [mm]	$d_S = S_s - S_b$ [mm]
1	5	141.4	141.1	0.3
1	6	141.4	141.7	-0.3
1	7	141.4	142.0	-0.6
2	3	141.4	140.8	0.6
2	4	141.4	141.1	0.3
2	8	141.4	141.1	0.3
3	4	141.4	141.8	-0.3
3	8	141.4	141.7	-0.3
4	8	141.4	142.0	-0.6
5	6	141.4	140.8	0.6
5	7	141.4	141.1	0.3
6	7	141.4	141.8	-0.3
1	8	173.2	173.6	-0.4
2	5	173.2	172.2	1.0
3	6	173.2	173.3	0.0
4	7	173.2	173.7	-0.5

Insgesamt ergeben sich dabei 16 Einzelwerte für die Strecken- bzw. Längenabweichungen, entsprechend zwölf Flächen- und vier Raumdiagonalen. Zur Beschreibung der Genauigkeit des bestimmten Würfels werden ihre maximale Längenabweichung L_{max} und die mittlere Längenabweichung L_m verwendet. Die maximale Längenabweichung wird dabei als Absolutwert (vgl. Kap. 8.1) definiert. Es gilt:

$$L_{max} = \max |d_S|$$

$$L_m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{16} (S_s - S_b)^2}{16}} \quad (6.3.13)$$

7 Scandatenverarbeitung zur Realisierung des Lösungsansatzes

7.1 Allgemeiner Überblick

In diesem Kapitel werden die Verarbeitungsschritte zur halbautomatisierten Registrierung der Scandaten mittels der vorgestellten Passwürfel beschrieben. Hierzu erfolgt zunächst die manuelle Selektion und das Ausschneiden der sich in der Aufnahmeszene befindlichen Würfel. Die weiteren Berechnungsschritte laufen automatisiert ab und werden mit Hilfe der Software Matlab von MathWorks ([Mat11a]) durchgeführt.

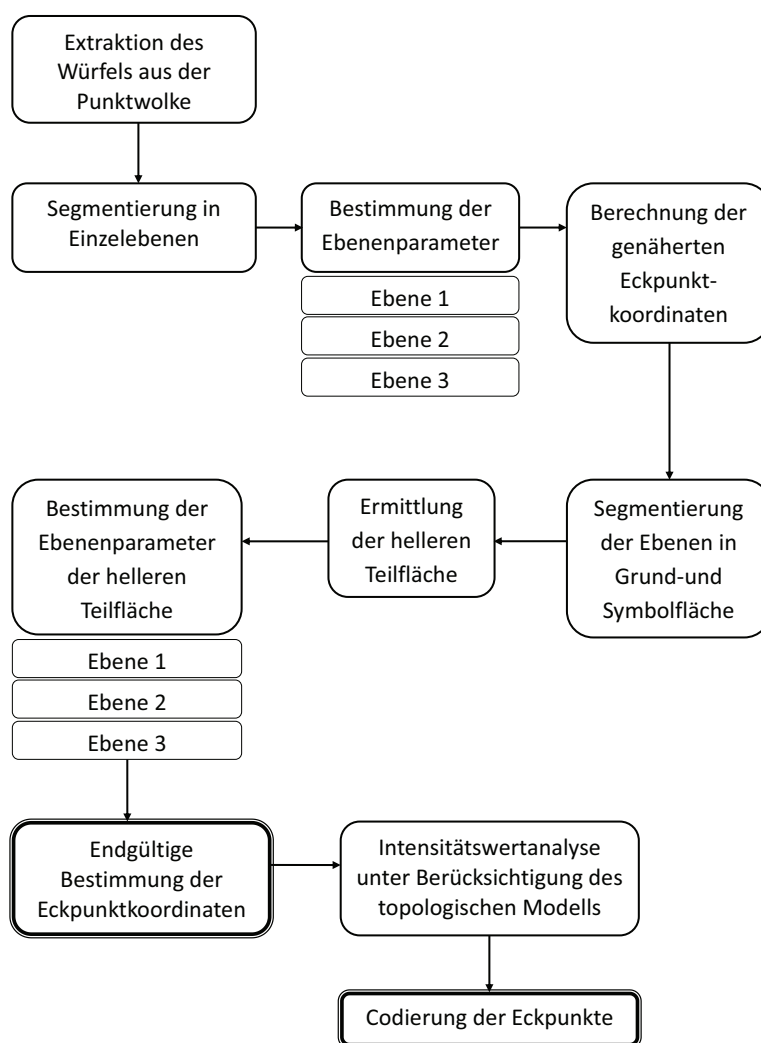


Abb. 7.1.1: Berechnungsschritte zur Bestimmung der codierten Eckpunkte eines Würfels

Um die Registrierung der Scandaten durchführen zu können, müssen die Koordinaten der Eckpunkte aller Würfel sowie ihre Codierung ermittelt und korrespondierende Eckpunkte einander zugeordnet werden. Dies erfordert eine Reihe von Verarbeitungsschritten, die in Abb. 7.1.1 dargestellt sind.

Die Bestimmung der Eckpunkte der Würfel erfolgt in einem mehrstufigen Prozess. Zunächst muss der

Würfel aus der Punktwolke extrahiert und eine Segmentierung in seine einzelnen Ebenen sowie die Bestimmung der jeweiligen Ebenenparameter vorgenommen werden. Im Anschluss lassen sich gemäß Kap. 6.2.3 die Koordinaten der Würfeckpunkte berechnen.

Tests haben gezeigt, dass diese Eckpunkte als Näherungseckpunkte aufgefasst werden sollten, da bei der gemeinsamen Ausgleichung von Grund- und Symbolfläche im Vergleich zur Ausgleichung der alleinigen helleren Teilfläche signifikante Unterschiede bei der Bestimmung der Standardabweichung der Gewichtseinheit und in den Ergebnissen für die Parameter des Normalenvektors auftreten (Kap. 7.3.5.3).

Aufgrund dessen erfolgt in einem weiteren Verarbeitungsschritt die Segmentierung der Würfebenen in ihre Teilflächen und die Bestimmung der Normalenvektoren der jeweils helleren Teilfläche. Danach werden die endgültigen Eckpunkte berechnet.

Abschließend folgt die Intensitätswertanalyse zur Bestimmung der vom Scanner „sichtbaren“ Ebenen und somit die Bestimmung der räumlichen Ausrichtung des Würfels (Kap. 7.4.2).

7.2 Würfelextraktion

Die manuelle Extraktion der Würfel erfolgt mit der Scansoftware Cyclone von Leica Geosystems ([Lei11b]), wobei im Wesentlichen unterschiedliche Boundingboxfunktionen zur Anwendung kommen.

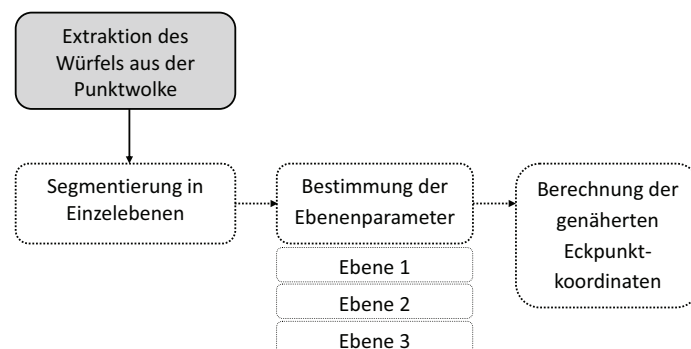


Abb. 7.2.1: Manuelle Extraktion des Würfels aus der Punktwolke

Die Abbildungen 7.2.2(a) und 7.2.2(b) zeigen einen gescannten Würfel vor einer Wand. Für die nachfolgende automatisierte Berechnung muss der Würfel vom Hintergrund isoliert werden, sodass sich die Punktwolke des Würfels wie in Abb. 7.2.2(c) darstellt.

Die den Würfel repräsentierenden Punkte werden anschließend in eine ASCII-Datei exportiert (Abb. 7.2.3), die sowohl die kartesischen Koordinaten der Punkte X, Y, Z – bezogen auf das lokale Scannerkoordinatensystem – als auch deren Intensitätswerte I enthält. Eine solche Datei wird für jeden Würfel von jedem einzelnen Scannerstandpunkt erzeugt. Die Würfel erhalten zuvor eine Nummerierung bzw. ID, um sie von den einzelnen Scannerstandpunkten eindeutig identifizieren zu können.

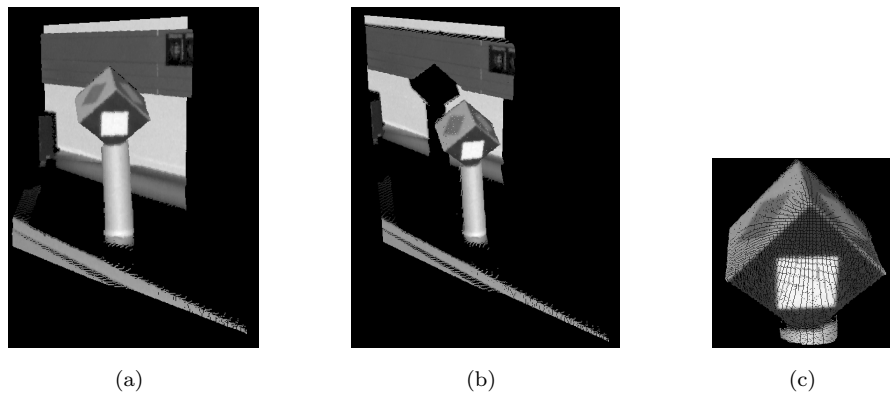


Abb. 7.2.2: *Extraktion eines Würfels aus der Punktwolke – (a) und (b) Würfel mit Hintergrund – (c) Ausgeschnittener Würfel*

Punktzahl			
10559			
-5.5050	4.9575	-0.8097	-1963
-5.5011	4.8747	-0.9005	-160
-5.5014	4.8750	-0.9064	-15
-5.5009	4.8746	-0.9075	-142
X [m]	Y [m]	Z [m]	Intensität [-2047 bis 2048]

Abb. 7.2.3: *Eingabedatei*

Bei der Erfassung des Würfels ist darauf zu achten, dass drei Würfelebenen für den Scanner „sichtbar“ sind. Das bedeutet, dass die Ebenen nicht durch andere Objekte verdeckt sein dürfen und der Laserstrahl möglichst nicht mit einem Auftreffwinkel $>80^\circ$ auf die Ebenen treffen sollte.

Durch eine ungünstige Wahl des Scannerstandpunktes und der Scannerhöhe lassen sich unter Umständen nur eine oder zwei Ebenen des Würfels erfassen. Diese sind in Abb. 7.2.4 in unterschiedlichen Grautönen dargestellt. Besitzt der Scanner dieselbe Aufbauhöhe wie der Würfel ist die obere Ebene nicht sichtbar (Abb. 7.2.4 (a) und (b)).

Ebenso sollte auf die Sichtbarkeit der beiden anderen Ebenen durch geeignete Aufstellung geachtet werden. In Abb. 7.2.4 (a) ist die ungünstigste Aufstellung zu sehen. Bei dieser verlaufen der Normalenvektor einer Würfebene und der Richtungsvektor vom Scannerstandpunkt zum Ebenenpunkt nahezu parallel, sodass nur diese Ebene sichtbar ist.

Zusätzliche Probleme bei der Erfassung der oberen Würfebene können bei Aufnahmeentfernungen von mehr als 15m entstehen, wenn der Würfel ohne Adapter gelagert wird, sodass die Deckelfläche des Würfels in etwa parallel zur X-Y-Ebene des Scanners ausgerichtet ist. Bei einer Höhendifferenz zwischen dem Nullpunkt des Scannerkoordinatensystems und der Deckelfläche des Würfels von 1.5m ergibt sich beispielsweise ein Auftreffwinkel ca. 84° , sodass keine oder nur wenige Punkte erfasst werden können.

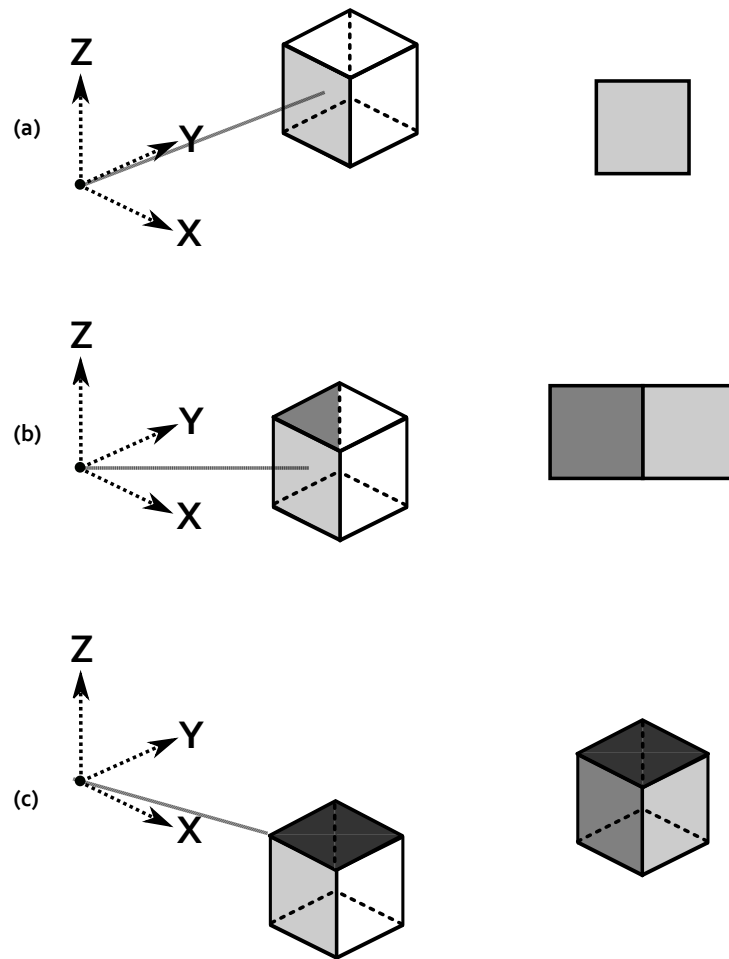


Abb. 7.2.4: Anzahl der erfassbaren Würfebenen bei unterschiedlichen Sichten – (a) eine Ebene – (b) zwei Ebenen – (c) drei Ebenen – links: Aufnahmekonfiguration von Scanner und Würfel – rechts: Sicht des Scanners auf die Würfebene(n)

Um möglichst alle drei Ebenen zu erfassen, ist demnach eine geeignete Wahl des Scannerstandpunktes und der Scannerhöhe vorzunehmen.

Der entwickelte Lösungsansatz ist darauf zugeschnitten, dass drei Ebenen des Würfels vom jeweiligen Scannerstandpunkt erfasst werden. Dies stellt zugleich den Allgemeinfall dar, der im Folgenden erläutert wird.

Unter gewissen Voraussetzungen lassen sich die Würfелеckpunkte aber auch bestimmen, wenn nur zwei Ebenen des Würfels – beispielsweise aufgrund eines ungünstigen Aufnahmewinkels – aufgenommen werden können:

1. Bodenflächen können als Ersatzebenen verwendet werden, wenn der Würfel auf einer Ebene aufliegt und eine Parallelität dieser Ebene zur Deckelfläche des Würfels vorausgesetzt wird.
2. Die Ebenencodierung der zwei erfassten Ebenen muss eindeutig ermittelbar sein. Die hierzu notwendigen Bedingungen werden im Rahmen des allgemeinen Lösungsansatzes erläutert.

7.3 Berechnung der Würfelemente

7.3.1 Ebenensegmentierung mittels RANSAC-Algorithmus

Der Extraktion des Würfels aus der Punktwolke schließt sich die Segmentierung in seine einzelnen Ebenen und die Bestimmung ihrer Normalenvektoren an. Hierbei muss gewährleistet sein, dass Ausreißer eliminiert und die Ebenenparameter zuverlässig bestimmt werden.

Zur Durchführung der Segmentierung wird auf bestehende Algorithmen in Matlab zurückgegriffen ([Mat08]), wobei ein von [Zul08] entwickelter RANSAC-Algorithmus (RANDOM SAMPLE CONSENSUS) ([FB80]) zur Anwendung kommt. Dieser wird für die Aufgabenstellung entsprechend modifiziert und beruht auf dem in [TZ00] beschriebenen Verfahren.

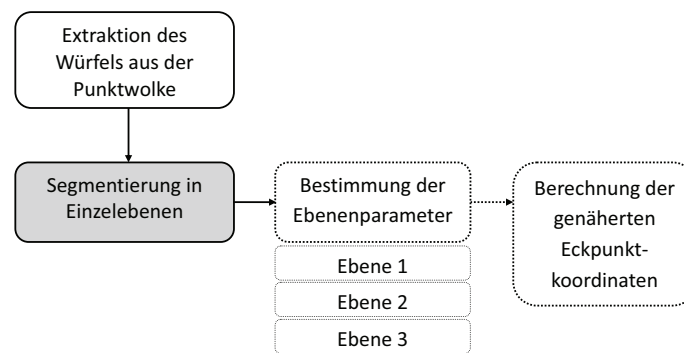


Abb. 7.3.1: Segmentierung der Einzelebenen

Der RANSAC-Algorithmus ermöglicht eine Schätzung von Modellparametern auf Basis von Messwerten, auch wenn diese mit einer großen Anzahl von Ausreißern behaftet sind ([HZ03]). Es handelt sich um ein iteratives Verfahren, bei dem im ersten Schritt aus dem Datensatz bzw. der Punktmenge zufällig eine minimale Anzahl an Punkten (minimaler Datensatz), entnommen wird, die notwendig ist, um die Modellparameter bestimmen zu können. Im Anschluss erfolgt die Berechnung der Modellparameter ausschließlich mit diesem minimalen Datensatz.

Für die zu schätzende Ebene werden demnach zunächst zufällig drei Punkte, die nicht auf einer Geraden liegen, aus der Gesamtpunktmenge entnommen und mit diesen drei Punkten eine Ebene mit ihren Ebenenparametern geschätzt.

Im zweiten Schritt erfolgt die Überprüfung, welche weiteren Punkte des kompletten Datensatzes mit den im ersten Schritt geschätzten Parametern vereinbar sind. Als Überprüfungskriterium wird der Abstand δ_{P_i} des jeweiligen Punktes $(p_{x_i}, p_{y_i}, p_{z_i})$ zur geschätzten Ebene verwendet.

$$\delta_{P_i} = \frac{n_x \cdot p_{x_i} + n_y \cdot p_{y_i} + n_z \cdot p_{z_i} + D}{\sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2}} \quad (7.3.1)$$

Liegt δ_{P_i} unterhalb eines definierten Schwellwertes t_n , der den maximal zulässigen senkrechten Abstand eines Punktes P zur Ebene E beschreibt, um noch als Ebenenpunkt klassifiziert zu werden, erfolgt die Hinzunahme des jeweiligen Punktes zum Datensatz.

$$\delta_P \leq t_n \Rightarrow P \in E \quad (7.3.2)$$

Der Algorithmus bietet zwei unterschiedliche Möglichkeiten zur Festlegung des Schwellwertes t_n . Zum einen lässt sich der Schwellwert durch die Berücksichtigung einer Wahrscheinlichkeitsfunktion spezifizieren, zum anderen kann er absolut definiert werden.

Aufgrund der besseren Kontrollmöglichkeit wird der Schwellwert t_n unter Berücksichtigung des erwarteten Messrauschens σ_s absolut festgesetzt. Es gilt:

$$t_n^2 = \sigma_s^2 \quad (7.3.3)$$

Die in Kap. 2.4 vorgestellten Ergebnisse haben gezeigt, dass das Messrauschen innerhalb der Herstellerangabe für den verwendeten Scanner HDS 6000 liegen (Abb. 2.4.2). Da alle Würfel in dem untersuchten Entfernungsbereich bis 25m liegen, wird ein Schwellwert von $t_n = \sigma_s = 4\text{mm}$ festgelegt. Die Einschränkung auf einen Entfernungsbereich bis 25m erfolgt aufgrund der Auflösung, mit der ein Würfel der Kantenlänge $k_l = 100\text{mm}$ in dieser Entfernung erfasst werden kann (Tab. 2.2.1).

Zur Prüfung der Eignung des gesetzten Schwellwertes können die Residuen bzw. deren Verteilung nach der Ebenenausgleichung (Kap. 7.3.2) herangezogen werden.

Nach jeder Iteration des RANSAC-Algorithmus wird gespeichert, welche Messwerte die Ebene unterstützen. Der Algorithmus stoppt, wenn die Wahrscheinlichkeit einen besseren Datensatz zu finden, unter einen Schwellwert fällt. Nach Abschluss des RANSAC-Algorithmus liegen die klassifizierten Punkte als Inlier – auch als Consensus Set (CS) bezeichnet – und Outlier vor.

Der RANSAC-Algorithmus wird im Rahmen der Verarbeitungskette genutzt, um die Ebenen zu segmentieren und Ausreißer aus dem Datensatz zu entfernen. Die Bestimmung der Ebenenparameter und die weiteren Berechnungen erfolgen im Anschluss durch eigens implementierte Verfahren. Um die Parameter aller drei Ebenen zu ermitteln, wird der RANSAC-Algorithmus und die nachfolgende Ebenenausgleichung dreimal durchlaufen.

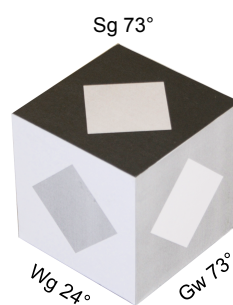


Abb. 7.3.2: Beispielhafte Ausrichtung eines Würfels mit Angabe der Ebenencodierung und des Auftreffwinkels des Laserstrahls auf die Teilflächen

Für den in Abb. 7.3.2 dargestellten Würfel zeigen die Abb. 7.3.3 und 7.3.4 die Ergebnisse der Ebenensegmentierung. In Abb. 7.3.3 sind die als Ebenenpunkte klassifizierten Punkte grau dargestellt, während die schwarzen die Ausreißer repräsentieren.

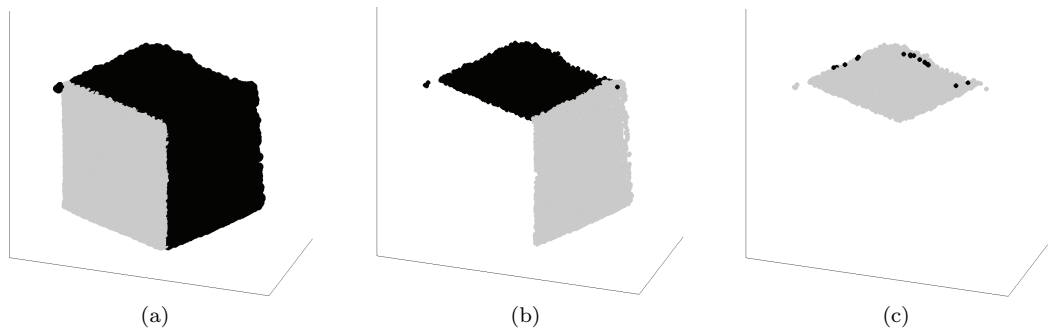


Abb. 7.3.3: Ebenensegmentierung mittels RANSAC-Algorithmus – (a) Ebene 021 (links) – (b) Ebene 013 (rechts) – (c) Ebene 036 (oben)

Abb. 7.3.4 zeigt zusammenfassend die identifizierten Punkte aller drei Ebenen.

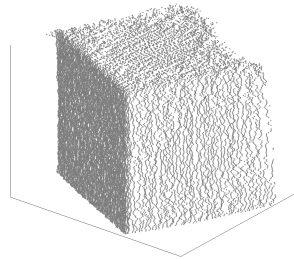


Abb. 7.3.4: Ebenenpunkte aller drei Ebenen nach Anwendung des RANSAC-Algorithmus

Bei der Berechnung ist sicherzustellen, dass keine Ebenen detektiert werden, die nicht zum Würfel gehören. Eine Kontrolle bietet die Berechnung der Schnittwinkel der Normalenvektoren (Kap. 6.3.3). Wird der Sollwinkel von 90° weit unter- bzw. überschritten, so deutet dies auf eine fehlerhafte oder falsche Ebene hin.

In Kap. 6.3.3 ist ein Beispiel für die Abweichung der Schnittwinkel der Normalenvektoren vom Sollwinkel aufgezeigt worden. Die Auswertung von mehr als hundert Würfeln ergab maximale Abweichungen von $\pm 2.5^\circ$. In einigen wenigen Fällen traten Abweichungen von mehr als $\pm 3^\circ$ auf, die auf fehlerhaft detektierte Ebenen hindeuten. Aufgrund dessen wird ein Schwellwert von $\pm 3^\circ$ eingeführt (vgl. Kap. 8.1.3).

7.3.2 Berechnung der Ebenenparameter durch Ebenenausgleichung

Nach jedem Durchlauf des RANSAC-Algorithmus müssen unter Verwendung der als Ebenenpunkte klassifizierten Punkte die Ebenenparameter – der Normalenvektor der Ebene mit seinen Komponenten n_x , n_y , n_z sowie der Abstand der Ebene zum Ursprung d – geschätzt werden.

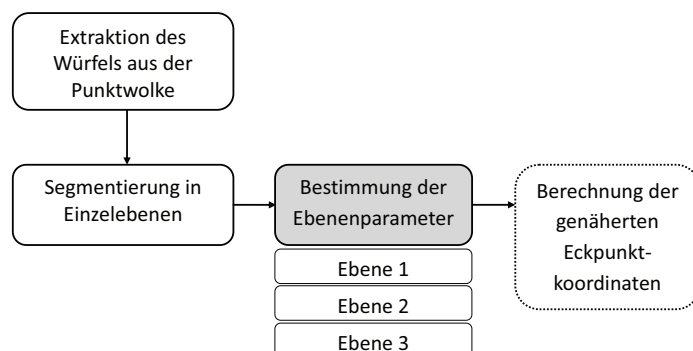


Abb. 7.3.5: Bestimmung der Ebenenparameter

Hierzu ist ein überbestimmtes Gleichungssystem zu lösen, das auf Gleichung (6.2.9) beruht.

$$f(n_x, n_y, n_z, d) : n_x x_i + n_y y_i + n_z z_i - d = 0 \quad \text{mit } i = 1, \dots, p \quad (7.3.4)$$

Nach [KR04] bestehen zur Lösung dieses Gleichungssystems unterschiedliche Möglichkeiten. Unter anderem wird das in [Dri93] beschriebene Verfahren erläutert, das die Minimierung der Summe der Quadrate der orthogonalen Abstände gegebener Punkte zur ausgleichenden Ebene vorsieht. Der Parametervektor, der die Komponenten des Normalenvektors darstellt, ergibt sich nach dieser Methode als der zum kleinsten Eigenwert der Matrix M gehörende normierte Eigenvektor.

$$M = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n (x_i - x_s)^2 & \sum_{i=1}^n (x_i - x_s)(y_i - y_s) & \sum_{i=1}^n (x_i - x_s)(z_i - z_s) \\ \sum_{i=1}^n (x_i - x_s)(y_i - y_s) & \sum_{i=1}^n (y_i - y_s)^2 & \sum_{i=1}^n (y_i - y_s)(z_i - z_s) \\ \sum_{i=1}^n (x_i - x_s)(z_i - z_s) & \sum_{i=1}^n (y_i - y_s)(z_i - z_s) & \sum_{i=1}^n (z_i - z_s)^2 \end{pmatrix} \quad (7.3.5)$$

Die ausgeglichene Ebene verläuft dabei durch den Schwerpunkt x_s, y_s, z_s der gegebenen Punkte, und es gilt:

$$x_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad y_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad z_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i \quad (7.3.6)$$

Der Abstand der Ebene vom Koordinatenursprung d lässt sich wie folgt ermitteln:

$$d = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \cdot n_x + \sum_{i=1}^n y_i \cdot n_y + \sum_{i=1}^n z_i \cdot n_z \right) \quad (7.3.7)$$

In Gleichung (7.3.7) ist darauf zu achten, dass das Vorzeichen für den Parameter d entgegen dem in [KR04] vorgestellten Verfahren gewählt wird (vgl. Abb. 6.2.1).

Als weitere Lösungsmethode stellt [KR04] einen Ausgleichungsansatz nach quasivermittelnden Beobachtungen vor, der als Bedingung die Normierung des Normalenvektors einführt. Durch diesen Ansatz können für die Unbekannten Fehlermaße und für die Beobachtungswerte Verbesserungen ermittelt werden.

Der in ähnlicher Form in Matlab implementierte Algorithmus basiert im Wesentlichen auf diesem Ansatz und berücksichtigt die allgemeinen Aspekte der Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen mit Bedingungen zwischen den Unbekannten nach [Höp80]. Die notwendige Bestimmung der Näherungswerte

erfolgt dabei mit dem zuvor geschilderten Eigenwertverfahren. Das der Ausgleichung zugrunde liegende funktionale Modell lautet:

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{l} + \mathbf{v} \Rightarrow \mathbf{v} = \mathbf{Ax} - \mathbf{l} \quad (7.3.8)$$

Darin stellt die Matrix \mathbf{A} die Koeffizientenmatrix, \mathbf{l} den Beobachtungsvektor und \mathbf{x} den Unbekanntenvektor dar. Da die Beobachtungen mit zufälligen Messfehlern behaftet sind, wird obige Gleichung nur durch Addition eines Rest- bzw. Verbesserungsvektors \mathbf{v} erfüllt.

Für das stochastische Modell gilt ([Nie02]):

$$\Sigma_{ll} = \sigma_0^2 \cdot Q_{ll} \quad (7.3.9)$$

Hierbei bezeichnet Σ_{ll} die Kovarianzmatrix, σ_0^2 die Varianz der Gewichtseinheit und Q_{ll} die Kofaktormatrix. Die Gewichtsmatrix P eines Beobachtungsvektors entspricht der Inversen der Kofaktormatrix Q_{ll} :

$$P = Q_{ll}^{-1} \quad (7.3.10)$$

Das Ziel der Ausgleichung besteht in der Minimierung der Summe der Quadrate der Verbesserungen. Durch Einführung der Matrix P , die den Beobachtungen unterschiedliche Gewichte zuordnet, ergibt sich:

$$\sum v^T P v = (Ax - l)^T P (Ax - l) \Rightarrow Min \quad (7.3.11)$$

Gleichung (7.3.4) muss für jeden Punkt (x_i, y_i, z_i) mit $i = 1, \dots, p$ Gültigkeit besitzen, sodass sich der Beobachtungsvektor \mathbf{l} in der folgenden Weise darstellen lässt:

$$\mathbf{l} = \begin{pmatrix} l_1 \\ l_2 \\ \dots \\ l_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} n_x x_1 + n_y y_1 + n_z z_1 - d \\ n_x x_2 + n_y y_2 + n_z z_2 - d \\ \dots \\ n_x x_p + n_y y_p + n_z z_p - d \end{pmatrix} \quad (7.3.12)$$

Die Koeffizienten- bzw. Designmatrix \mathbf{A} erhält die partiellen Ableitungen von (7.3.4) nach den Unbekannten.

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \frac{\partial l_1}{\partial n_x} & \frac{\partial l_1}{\partial n_y} & \frac{\partial l_1}{\partial n_z} & \frac{\partial l_1}{\partial d} \\ \frac{\partial l_2}{\partial n_x} & \frac{\partial l_2}{\partial n_y} & \frac{\partial l_2}{\partial n_z} & \frac{\partial l_2}{\partial d} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial l_p}{\partial n_x} & \frac{\partial l_p}{\partial n_y} & \frac{\partial l_p}{\partial n_z} & \frac{\partial l_p}{\partial d} \end{pmatrix} \quad (7.3.13)$$

Mit

$$\frac{\partial l_i}{\partial n_x} = x_i \quad \frac{\partial l_i}{\partial n_y} = y_i \quad \frac{\partial l_i}{\partial n_z} = z_i \quad \frac{\partial l_i}{\partial d} = -1 \quad (7.3.14)$$

erhält die A-Matrix folgende Gestalt:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & -1 \\ x_2 & y_2 & z_2 & -1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_p & y_p & z_p & -1 \end{pmatrix} \quad (7.3.15)$$

Wie aus Gleichung (7.3.4) ersichtlich und in [KR04] beschrieben, muss für die Parameter n_x , n_y , n_z und d eine zusätzliche Bedingung in die Ausgleichung eingeführt werden, da sich ansonsten die triviale Lösung mit $n_x = n_y = n_z = d = 0$ ergäbe. Als Bedingung kann die Normierung des Normalenvektors eingeführt und schließlich eine vermittelnde Ausgleichung mit Bedingungen durchgeführt werden ([Höp80]).

$$\varphi(n_x, n_y, n_z) : n_x^2 + n_y^2 + n_z^2 = 1 \Rightarrow n_x^2 + n_y^2 + n_z^2 - 1 = 0 \quad (7.3.16)$$

Der mittlere Fehler der Gewichtseinheit lässt sich nach [Höp80] mit Gleichung (7.3.17) berechnen, wobei n_p die Punktzahl, u die Anzahl der Unbekannten und r die Anzahl der Bedingungen wiedergibt.

$$m_0 = \frac{v^T P v}{n_p - (u - r)} \quad (7.3.17)$$

Neben den Komponenten des Normalenvektors und dem Abstand der Ebene vom Koordinatenursprung liefert die Ausgleichung die Verbesserungen bzw. Residuen der Beobachtungen. Ihre Häufigkeitsverteilung lässt sich in Form eines Histogramms graphisch darstellen und auf Normalverteilung prüfen. Nach [WS00] wird die Klassenanzahl m mit:

$$m \leq 5 \cdot \ln n_p$$

gewählt. Die Abbildungen 7.3.6 - 7.3.8 zeigen die Verteilungen der Residuen für die drei Ebenen des zuvor aufgezeigten Beispiels (siehe Abb. 7.3.2) bei der Parameterwahl $\sigma_s = 4\text{mm}$. Die schwarze Kurve zeigt die zugehörige Normalverteilung $N\{\mu, \sigma^2\}$ der Daten, wobei μ und σ^2 geschätzte Werte für den Erwartungswert und die Varianz repräsentieren.

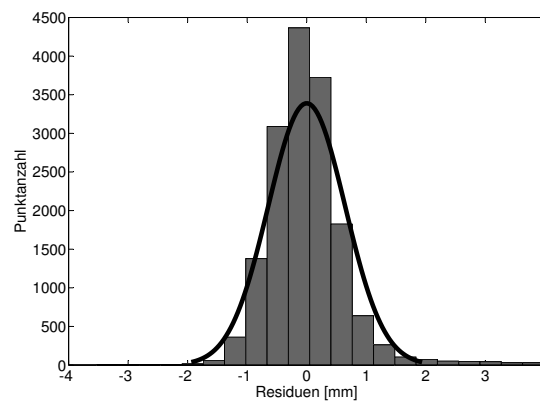


Abb. 7.3.6: Residuen der Ebene 021 (weiß-grau) mit Normalverteilung $N\{0, 0.42\}$

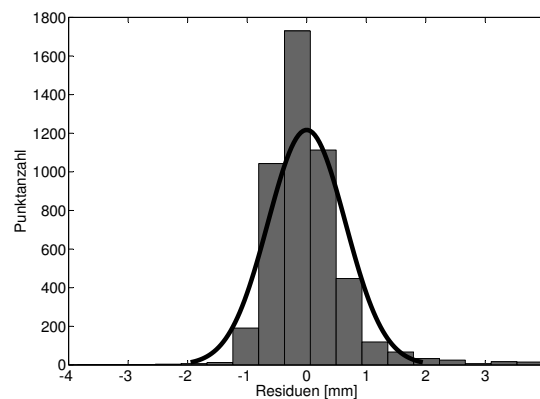


Abb. 7.3.7: Residuen der Ebene 013 (grau-weiß) mit Normalverteilung $N\{0, 0.43\}$

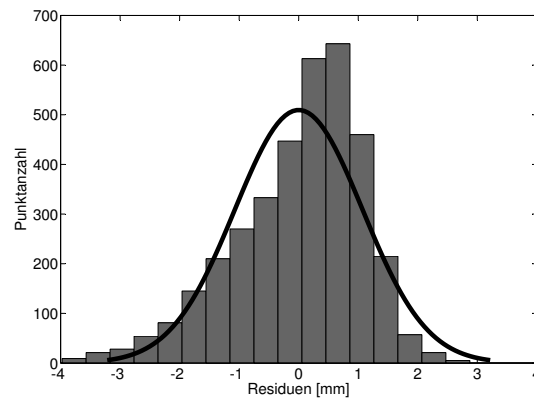


Abb. 7.3.8: Residuen der Ebene 036 (schwarz-grau) mit Normalverteilung $N\{0, 1.2\}$

Aus Abb. 7.3.8 ist die Schiefe der Verteilung der schwarz-grauen Ebene zu erkennen, die vermutlich auf einem unvollständigen Ausgleichsmodell basiert und in erster Linie bei der gemeinsamen Ausgleichung einer schwarzen mit einer grauen oder weißen Teilfläche auftritt. Bei der isolierten Auswertung der beiden Teilflächen einer Ebene verschwindet die Schiefe nahezu vollständig (Kap. 7.3.5.2).

Erwartungsgemäß ist die Verteilung der Residuen sehr stark von der Wahl des Parameters σ_s abhängig. Er muss so gewählt werden, dass er oberhalb des Messrauschens der dunkelsten Teilfläche liegt, da ansonsten eigentlich zum Ebenenmodell zugehörige Punkte aus der Punktwolke entfernt werden und Wiederholungsmessungen unterschiedliche Ergebnisse für die Unbekannten liefern. Erkennbar wird eine zu kleine Wahl des Parameters σ_s am Histogramm der Residuen. Wird der Parameter σ_s für eine Ebene zu gering gewählt, beispielsweise $\sigma_s = 2\text{mm}$, zeigt sich dies in der Verteilung der Residuen. Die Verteilung wird seitlich „abgeschnitten“. Dieser Effekt tritt vor allem bei schwarz-grauen oder grau-schwarzen Ebenen auf (Abb. 7.3.9 (b)). Bei Ebenen mit weißen und grauen Teilflächen zeigt sich dieser Effekt hingegen nicht (Abb. 7.3.9 (a)). Weitere Auswertungen von ca. 60 Teilflächen bestätigen dieses Ergebnis, sodass der Parameter σ_s für weiße und graue Flächen auch geringer gewählt werden könnte, da diese über ein geringeres Messrauschen verfügen (Abb. 2.4.2).

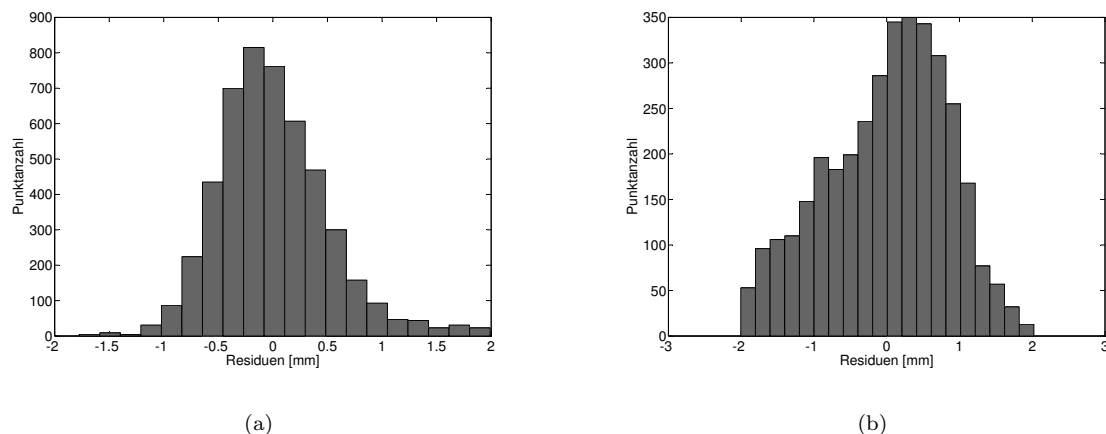


Abb. 7.3.9: Residuenverteilung bei $\sigma_s = 2\text{mm}$

(a) Ebene 013 (grau-weiß) – (b) Ebene 036 (schwarz-grau)

Die schwarzen Flächen limitieren somit das Genauigkeitspotential. Um dennoch eine höhere Genauigkeit bei der Ebenenschätzung zu erreichen, werden für die Berechnung jeweils die helleren Teilflächen der Ebenen verwendet. Hierzu ist die Separation der helleren von den dunkleren Teilflächen sowie die Berechnung von Näherungskoodinaten der Eckpunkte notwendig.

7.3.3 Näherungskoodinaten der Eckpunkte

Die Bestimmung der Näherungskoodinaten der Eckpunkte erfolgt nach den Gleichungen (6.2.13), (6.2.15) und (6.2.16), wobei die Lage der einzelnen Ebenen zueinander berücksichtigt werden muss.

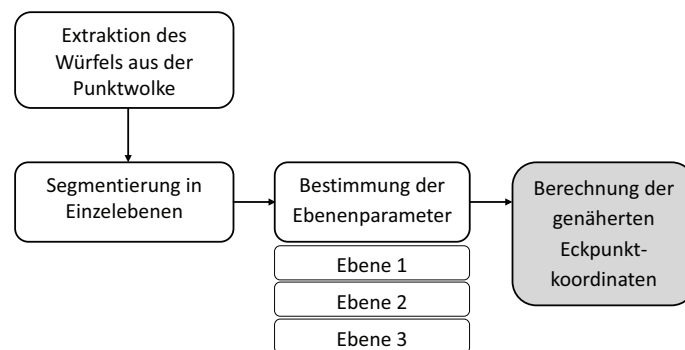


Abb. 7.3.10: Berechnung der genäherten Eckpunktkoodinaten

Hierzu kommt eine Pseudocodierung der Ebenen zum Einsatz. Diese gewährleistet, dass die Eckpunkte nach einer bestimmten Anordnung berechnet werden, die nicht mit der tatsächlichen übereinstimmen, allerdings generell möglich sein muss. Sie berücksichtigt die Lage der Ebenen zueinander und vergibt einen möglichen Code für die Eckpunkte.

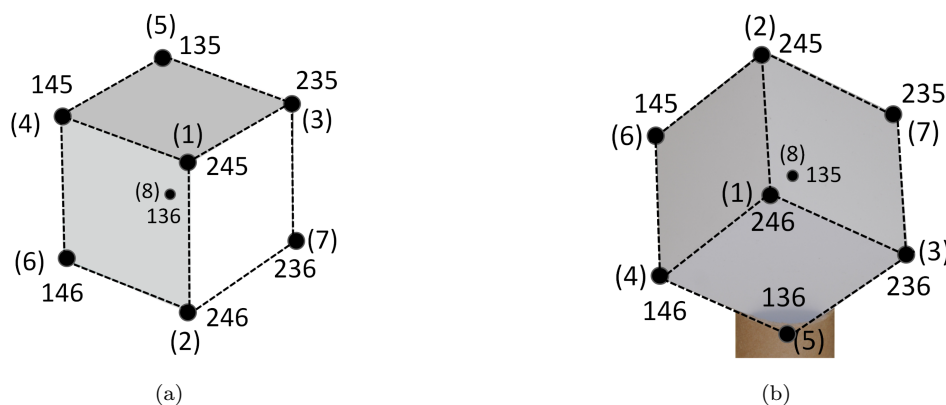


Abb. 7.3.11: Würfel mit Pseudocodierung

(a) Würfelansicht 0

(b) Würfelansicht 1

Die Pseudocodierung ist abhängig von der Würfelansicht (Abb. 7.3.11):

- Würfelsicht 0: Die Ebene in der Mitte, oberhalb der beiden anderen, erhält den Pseudocode 5. Die Ebene rechts bekommt den Pseudocode 2, die Ebene links den Code 4 zugewiesen. Die Eckpunkte werden in der in Klammern angegebenen Reihenfolge der Abbildung 7.3.11 (a) ermittelt und erhalten die dort angegebenen Pseudopunktnummern.
- Würfelsicht 1: Die Ebene, welche unterhalb der beiden anderen liegt, bekommt den Code 6. Die beiden anderen Ebenen erhalten wiederum die Codes 2 und 4. Die Bestimmungsreihenfolge der Eckpunkte lässt sich Abb. 7.3.11 (b) entnehmen.

Die Pseudocodierung gewährleistet damit die näherungsweise Bestimmung der Eckpunktkoordinaten des Würfels, ohne ihre tatsächliche Codierung und damit die tatsächliche Ausrichtung des Würfels im Raum zu kennen.

7.3.4 Segmentierung der Ebenen in ihre Teilflächen

Um die tatsächliche Codierung der Ebenen ermitteln zu können, erfolgt zunächst die Trennung von Grund- und Symbolfläche. Hierbei wird auf die bekannte Sollgeometrie des Würfels zurückgegriffen. Die Kantenlänge wird als bekannt angesehen und die Parallelität sich gegenüber liegender Kanten vorausgesetzt.

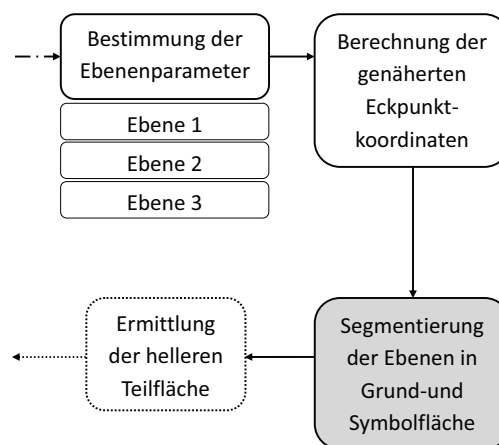


Abb. 7.3.12: Segmentierung in Grund- und Symbolfläche

Mit Hilfe der berechneten genäherten Eckpunkte lässt sich die Sollage der Symbolfläche im Bezug zur Grundfläche bestimmen. Abb. 7.3.13 stellt schematisch den Zusammenhang zwischen den Eckpunkten der Grundfläche (E_G) und den Eckpunkten der Symbolfläche (E_S) in 2D-Ansicht dar, wobei das entsprechende Koordinatensystem im unteren linken Eckpunkt des Würfels gelagert ist. Die Koordinaten der Symbolflächeneckpunkte E_{S1} - E_{S4} lassen sich in diesem Koordinatensystem gemäß Tab. 7.3.1 ausdrücken. Da es sich bei den berechneten Eckpunktkoordinaten des Würfels nur um Näherungskoordinaten handelt, werden jedoch nicht die tatsächlichen Symbolflächeneckpunkte zur Segmentierung verwendet, sondern ausgehend von diesen Punkten vier Begrenzungspunkte für die Symbol- (E_{Si}) und vier Begrenzungspunkte für die Grundfläche (E_{Gi}) nach innen berechnet. Der Bereich zwischen diesen Punkten gilt als sogenannter „Unsicherheitsbereich“ und ist in Abb. 7.3.14 (a) symbolisch durch die gestrichelten Linien dargestellt.

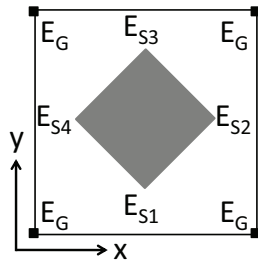


Abb. 7.3.13: Position der Symbolfläche in Bezug zur Grundfläche

Tab. 7.3.1: Position der Symbolfläche relativ zur Grundfläche mit Kantenlänge $k_l = 100\text{mm}$

Eckpunkt der Symbolfläche	x [mm]	y [mm]
1	50	15
2	85	50
3	50	85
4	15	50

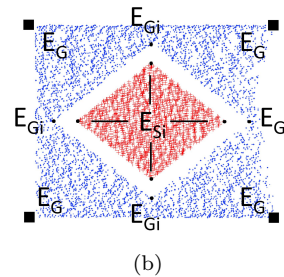
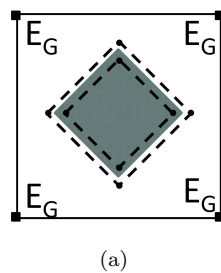


Abb. 7.3.14: Trennung von Grund- und Symbolfläche – (a) schematische Darstellung – (b) berechnete Punkte innerhalb der Grund- und Symbolfläche

Die Segmentierung erfolgt in drei Klassen:

- Punkte, die sich innerhalb des Unsicherheitsbereiches befinden, werden aus der Punktmenge entfernt und für die weiteren Berechnungen nicht mehr verwendet.
- Punkte innerhalb der Symbolflächenbegrenzung E_{Si} sind Symbolflächenpunkte.
- Punkte, die innerhalb der genäherten Würfecken E_G und der Grundflächenbegrenzung E_{Gi} liegen, werden als Grundflächenpunkte klassifiziert.

7.3.5 Analyse der Intensitätswerte der Teilflächen

7.3.5.1 Zielsetzung

Nach erfolgreicher Segmentierung der Ebenen in ihre Teilflächen erfolgt die Analyse ihrer Intensitätswerte, die zwei Ziele verfolgt:

1. Ermittlung der helleren Teilflächen der drei Ebenen, um den Einfluss des höheren Messrauschens der dunkleren Flächen zu reduzieren.
2. Bestimmung der Ebenencodierung der erfassten Ebenen und somit der Ausrichtung des Würfels im Raum (Kap. 7.4.2).

7.3.5.2 Ermittlung der helleren Teilflächen und ihrer Ebenenparameter

Zur Bestimmung der helleren der beiden Teilfläche erfolgt die Betrachtung ihrer Intensitätswertverteilung.

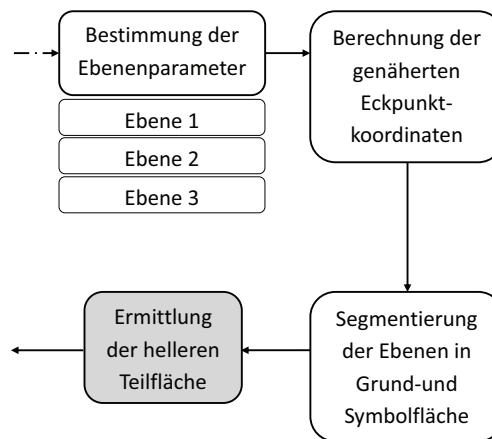


Abb. 7.3.15: Ermittlung der helleren Teilfläche der Ebene

Genutzt wird dabei das Intensitätswertspektrum von -2047 und 2048, entsprechend den vom Laserscanner aufgelösten 12 bit bzw. 4096 Graustufen (Abb. 7.3.16).

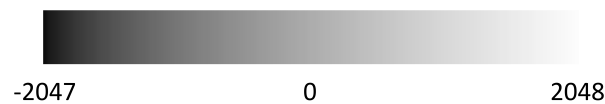


Abb. 7.3.16: Grauwerte der Intensitäten

Die Häufigkeitsfunktion der Intensitätswerte der Ebenen lässt sich mittels Histogramm graphisch darstellen. Die Abb. 7.3.17 zeigt die Intensitätswertverteilung der Ebene 021 (weiß-grau), die mit einem Auftreffwinkel von 24° erfasst wurde. Es sind deutlich zwei Peaks für die beiden Teilflächen sowie die höhere Punktzahl der weißen Teilfläche (Grundfläche) zu erkennen.

Werden beide Teilflächen isoliert betrachtet, kann für beide die Klasse mit der höchsten Häufigkeit ermittelt und der jeweilige Klassenmittelwert als Intensitätswert der Fläche registriert werden (Abb. 7.3.18).

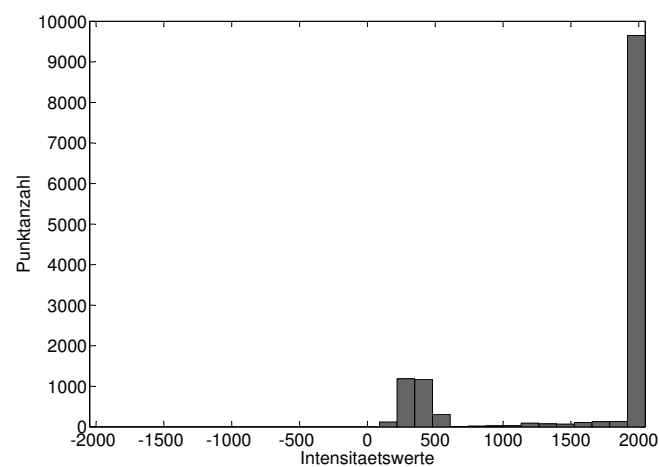


Abb. 7.3.17: Intensitätswertverteilung der Ebene 021 (Abb. 7.3.2: weiß-graue Ebene links unten)

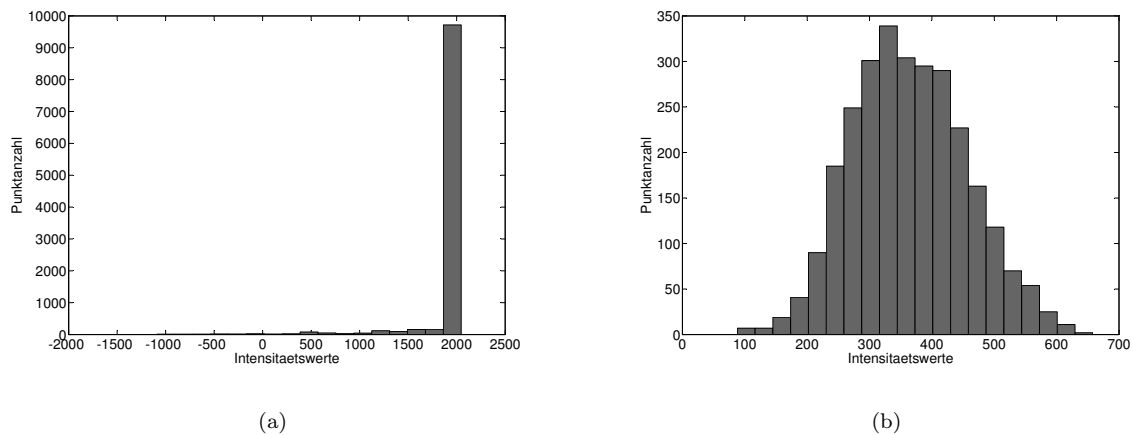


Abb. 7.3.18: Intensitätswertverteilung der Teilflächen der Ebene 021 (weiß-grau) – (a) weiße Grundfläche – (b) graue Symbolfläche

Die Intensitätswerte für beide Teilflächen liegen dabei in dem erwarteten Wertebereich, wenn von einer linearen Verteilung der Werte ausgegangen wird (vgl. Abb. 7.3.21).

Im Gegensatz dazu werden die weiße und graue Teilfläche der Ebene 013 (grau-weiß) mit wesentlich geringeren Intensitätswerten repräsentiert (Abb. 7.3.19).

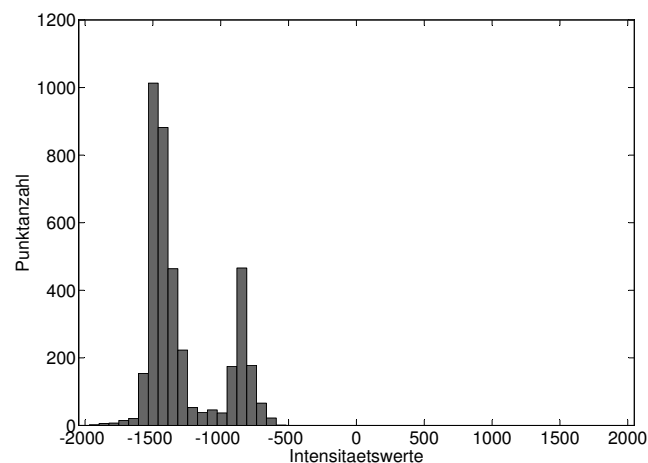


Abb. 7.3.19: Intensitätswertverteilung Ebene 013 (Abb. 7.3.2 grau-weiße Ebene rechts unten)

Auch in diesem Fall sind deutlich zwei Peaks für die beiden Teilflächen zu erkennen. Ebenso sichtbar ist die höhere Punktzahl der dunkleren Teilfläche, die somit als Grundfläche identifiziert werden kann. Allerdings ist ebenso auffällig, dass die Verteilung im dunklen Bereich angesiedelt ist, eigentlich jedoch Grauwerte aus dem mittleren und hellen Bereich repräsentiert werden müssten.

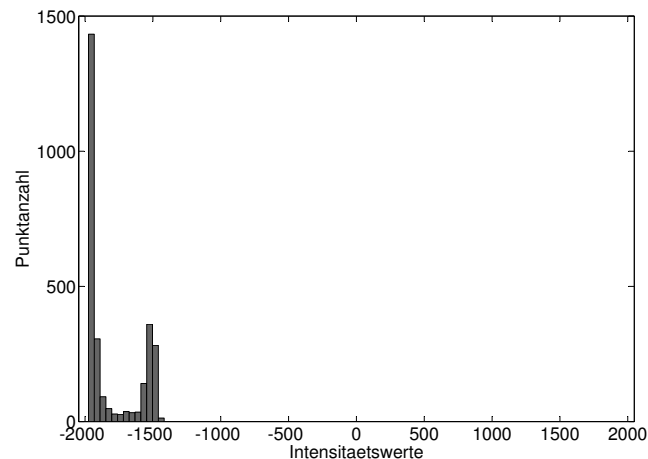


Abb. 7.3.20: Intensitätswertverteilung der Ebene 036 (Abb. 7.3.2: schwarz-graue Ebene mittig oben)

Die dritte, schwarz-graue Ebene 036 (Abb. 7.3.20) zeigt ein ähnliches Verhalten, wobei die geringen Intensitätswerte für die graue Teilfläche auffallen. Dennoch lässt sich auch bei dieser Ebene die hellere Teilfläche durch die Intensitätswertanalyse direkt ermitteln.

Abb. 7.3.21 veranschaulicht die ermittelten, am häufigsten auftretenden Intensitätswerte der drei Ebenen auf der Intensitätswertskala und stellt sie den theoretischen Wertebereichen – schwarz: -2047 bis -682, grau: -681 bis 683 und weiß: 684 bis 2048 – gegenüber. Während die Intensitätswerte der beiden Teilflächen der Ebene 021 in dem für sie theoretisch gültigen Wertebereich liegen, tritt bei den Intensitätswerten der Teilflächen der beiden anderen Ebenen eine Verschiebung in den dunkleren Bereich auf. Die Intensitätswerte dieser Flächen werden abgeschwächt und die beiden grauen sowie die weiße Teilfläche liegen nicht mehr in ihrem theoretischen Wertebereich.

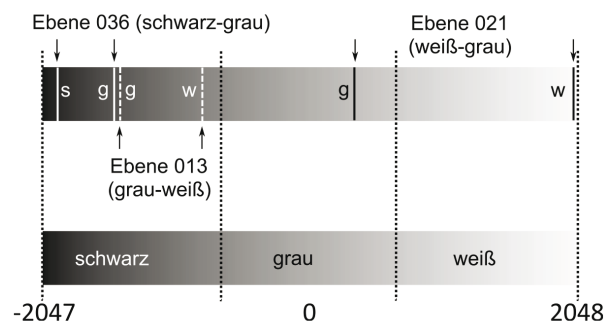


Abb. 7.3.21: Ermittelte Intensitätswerte der Teilflächen der drei Ebenen

Tab. 7.3.2 fasst die Ergebnisse zusammen. Hierbei sind neben den Intensitätswerten – I_G entspricht dem Intensitätswert der Grundfläche, I_S dem der Symbolfläche – zusätzlich die Entfernungen und Auftreffwinkel der Ebenen sowie deren LG-Code und die Punktzahlen von Grund- (P_G) und Symbolfläche (P_S) nach ihrer Separation dargestellt. Die Teilflächen, aus denen nachfolgend die Ebenenparameter bestimmt werden, sind mit einem Stern (*) gekennzeichnet.

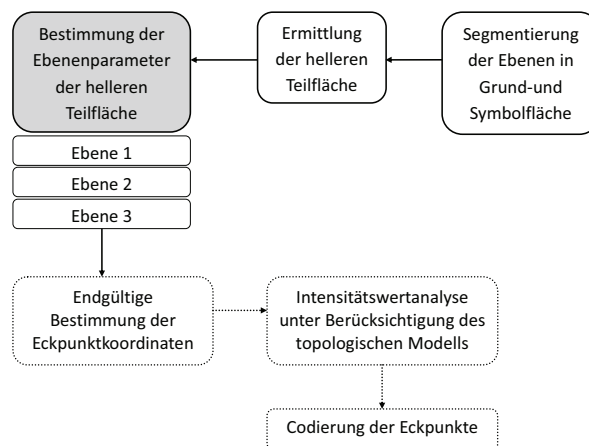
Tab. 7.3.2: *Analyse der Intensitätswerte*

Abstand [m]	LG-Code	Auftreff- winkel [°]	P_G	P_S	I_G	I_S
5	013	73	2920	924*	-1461	-847
5	021	24	10340*	2797	2015	330
5	036	73	1951	886*	-1959	-1498

Das Beispiel verdeutlicht, dass eine direkte Zuordnung der Teilflächen zu ihrem jeweiligen Grauwert anhand ihrer Intensitätswerte nicht möglich ist. Die Ursache hierfür liegt im schon benannten Einfluss des Auftreffwinkels auf die Intensitätswerte.

In Kap. 7.4.2 folgen hierzu eingehende Untersuchungen, und es wird gezeigt, dass die Ebenencodierung mit Hilfe der Intensitätswertanalyse unter Berücksichtigung des Auftreffwinkels und dem topologischen Modell des Würfels möglich ist.

Nach der Bestimmung der helleren Teilflächen aller drei Ebenen, kommen erneut der RANSAC-Algorithmus und die Ebenenausgleichung zur Anwendung.

**Abb. 7.3.22:** *Bestimmung der Ebenenparameter der helleren Teilfläche*

Unter Beibehaltung des Schwellwertes $\sigma_s = 4\text{mm}$ zeigen sich geringere Residuen für die Teilflächen, die sich über den Wertebereich von $\pm 2\text{mm}$ erstrecken.

Durch die Verwendung der helleren Teilflächen und deren geringerem Messrauschen findet keine „Beschneidung“ der Residuen – im Gegensatz zur gemeinsamen Ausgleichung der beiden Teilflächen der schwarz-grauen Ebene (Abb. 7.3.9 (b)) – statt. Abb. 7.3.23 veranschaulicht die segmentierten helleren Flächen der Ebenen 1-3. Die Histogramme der Residuen bei der alleinigen Ausgleichung der jeweils helleren Teilfläche sind in den Abbildungen 7.3.24 - 7.3.26 gemeinsam mit der Normalverteilung $N\{\mu, \sigma^2\}$ dargestellt.

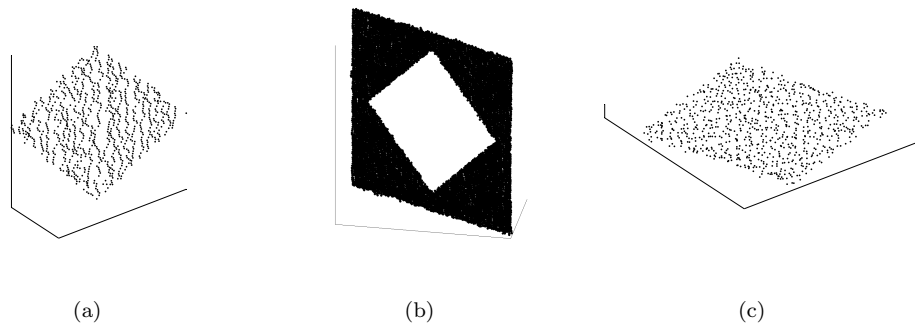


Abb. 7.3.23: Teilflächensegmentierung – (a) weiße Symbolfläche der Ebene 013 (924 Punkte) – (b) weiße Grundfläche der Ebene 021 (10340 Punkte) – (c) graue Symbolfläche der Ebene 036 (886 Punkte)

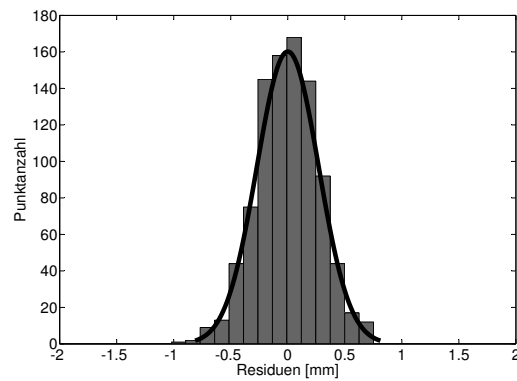


Abb. 7.3.24: Residuen der weißen Symbolfläche der Ebene 013 (grau-weiß) mit $N\{0, 0.07\}$

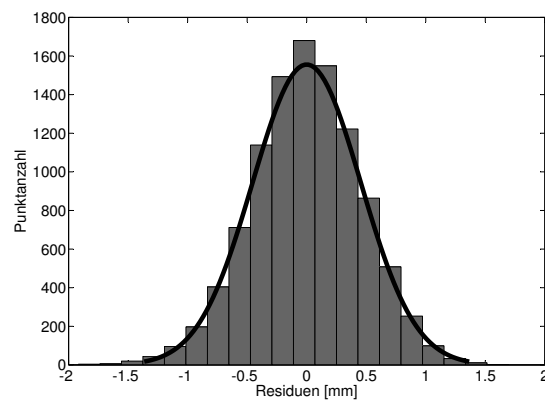


Abb. 7.3.25: Residuen der weißen Grundfläche der Ebene 021 (weiß-grau) mit $N\{0, 0.21\}$

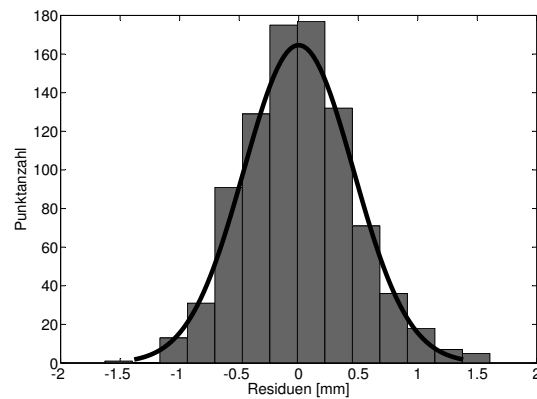


Abb. 7.3.26: Residuen der grauen Symbolfläche der Ebene 036 (schwarz-grau) mit $N\{0, 0.21\}$

Die Schiefe der Verteilung der Ebene 036 tritt bei der alleinigen Ausgleichung der helleren Teilfläche nicht mehr auf (Abb. 7.3.26). Ebenso zeigen die Verteilungen nach Ausgleichung der dunkleren Teilflächen keine Schiefe (s. Anhang Abb. C.1 - C.3). Sie verfügen über höhere Schätzwerte für die Varianz, wobei der Wert für die schwarze Teilfläche erwartungsgemäß am größten ist.

Die Ergebnisse der Ebenenausgleichung für die Teilflächen sind in Tab. 7.3.3 zusammengefasst.

Tab. 7.3.3: Ermittelte Ebenenparameter nach der Ausgleichung der helleren Teilflächen

LG-Code	Ebenenparameter			
	n_x	n_y	n_z	d
013	0.4394 ± 0.0004	0.8983 ± 0.0002	-0.0038 ± 0.0004	0.0396 ± 0.0000
021	-0.9016 ± 0.0000	0.4325 ± 0.0000	0.0084 ± 0.0000	-0.0171 ± 0.0000
036	0.0201 ± 0.0007	-0.0060 ± 0.0007	0.9998 ± 0.0000	0.0412 ± 0.0000

Nach Kontrolle der Schnittwinkel der Normalenvektoren (Kap. 6.3.3) lassen sich nun die endgültigen Eckpunktkoordinaten des Würfels berechnen.

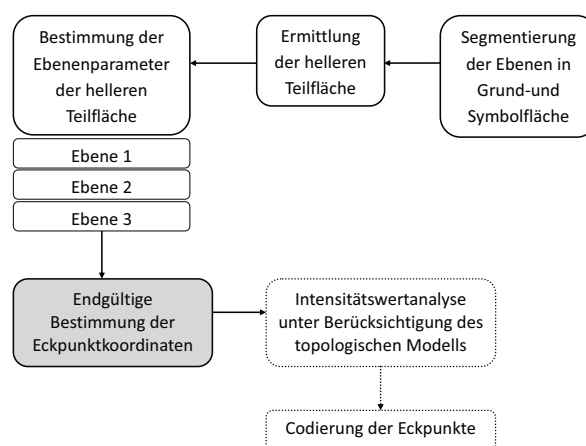


Abb. 7.3.27: Endgültige Bestimmung der Eckpunktkoordinaten

7.3.5.3 Signifikanztest

Mit Hilfe eines zuvor durchgeführten Signifikanztests soll sichergestellt werden, dass durch die Verwendung der helleren Teilfläche in Bezug zu der gemeinsamen Ausgleichung von Grund- und Symbolfläche bei der Ebenenschätzung signifikante Unterschiede in den Standardabweichungen bestehen.

Hierzu findet der F-Test Anwendung ([PTVF07], [MMSW00]). Der F-Test testet, ob sich zwei Standardabweichungen (σ_1, σ_2) bzw. Varianzen zweier Grundgesamtheiten signifikant unterscheiden oder nicht. Die Nullhypothese H_0 geht davon aus, dass keine signifikanten Unterschiede bestehen, und es gilt:

$$H_0 := \sigma_1 = \sigma_2 \quad (7.3.18)$$

Die Prüfgröße lautet:

$$\hat{F} = s_{ges}^2 / s_{teil}^2, \quad (7.3.19)$$

wobei mit s_{ges}^2 die Varianz der kompletten Ebene und mit s_{teil}^2 die Varianz der helleren Teilfläche der Ebene bezeichnet wird.

Der Schwellwert F_s wird aus der Tabelle der F-Verteilung ([And00]) entnommen, wobei das Signifikanzniveau α_t sowie die Freiheitsgrade der beiden Stichproben zu berücksichtigen sind. Bei

$$\hat{F} < F_s \quad (7.3.20)$$

wird die Nullhypothese angenommen, d.h. die Standardabweichungen unterscheiden sich nicht signifikant. Andernfalls wird bei

$$\hat{F} > F_s \quad (7.3.21)$$

die Nullhypothese verworfen und ein signifikanter Unterschied der Standardabweichungen angenommen. Die Auswertung von etwa 40 Ebenen ergab dabei in ca. 95% der Fälle einen signifikanten Unterschied. Exemplarische Ergebnisse sind im Anhang D zu finden.

Um zu überprüfen, ob sich die Ergebnisse der Gesamtebene für die Komponenten des Normalenvektors n_x, n_y, n_z und für den Abstand der Ebene zum Ursprung d von den Resultaten der Teilfläche signifikant unterscheiden, kommt der t-Test zur Anwendung.

In Anlehnung an [SH09] lässt sich die Prüfgröße t_x für die x-Komponente des Normalenvektors wie folgt berechnen:

$$t_x = \frac{|n_{x_{teil}} - n_{x_{ges}}|}{\sqrt{\left(\frac{pkt_{teil} + pkt_{ges}}{pkt_{teil} \cdot pkt_{ges}}\right) \cdot \left(\frac{(pkt_{teil} - 1)n_{f_{x_{teil}}}^2 + (pkt_{ges} - 1)n_{f_{x_{ges}}}^2}{pkt_{teil} + pkt_{ges} - 2}\right)}} \quad (7.3.22)$$

mit

- $n_{x_{teil}}, n_{x_{ges}}$ – durch Ausgleichung berechnete x-Komponente des Normalenvektors der Teilfläche bzw. der Gesamtebene.
- $n_{f_{x_{teil}}}, n_{f_{x_{ges}}}$ – durch Ausgleichung berechneter Fehler der x-Komponente des Normalenvektors der Teilfläche bzw. der Gesamtebene.
- pkt_{teil}, pkt_{ges} – Punktzahl der Teilfläche und der Gesamtebene.

Erfüllt die nach (7.3.22) berechnete Größe t_x die Ungleichung

$$|t_x| > t_{\alpha_t, k} \quad (7.3.23)$$

mit Freiheitsgrad $k = pkt_{teil} + pkt_{ges} - 2$ und Signifikanzniveau α_t , wird die Nullhypothese H_0 verworfen. Dann existiert ein signifikanter Unterschied zwischen der x-Komponente des Normalenvektors, die mit den Punkten der Teilfläche und mit den Punkten der Gesamtebene berechnet wird. Analog lassen sich die Unterschiede in den y- und z-Komponenten sowie dem Abstand der Ebene vom Ursprung auf Signifikanz prüfen.

Gemäß Tab. D.2 im Anhang ergeben sich aufgrund der großen Stichprobenumfänge sehr hohe Werte für die Prüfgrößen t_x , t_y , t_z und t_d , sodass sich die Ergebnisse mit einer sehr hohen Wahrscheinlichkeit signifikant unterscheiden. Für die endgültige Berechnung der Würfeckpunkte wird deshalb die hellere Teilfläche verwendet.

7.4 Ermittlung der Ebenencodierung

7.4.1 Allgemein

Mit der bisher aufgezeigten Vorgehensweise lassen sich die Eckpunkte des Würfels zwar berechnen, allerdings ist die Ausrichtung des Würfels im Raum nicht bekannt, sodass die notwendige Codierung der Eckpunkte noch nicht erfolgen kann. Zu ihrer Bestimmung sind weitere Analysen der Intensitätswerte der Teilflächen der drei erfassten Ebenen notwendig.

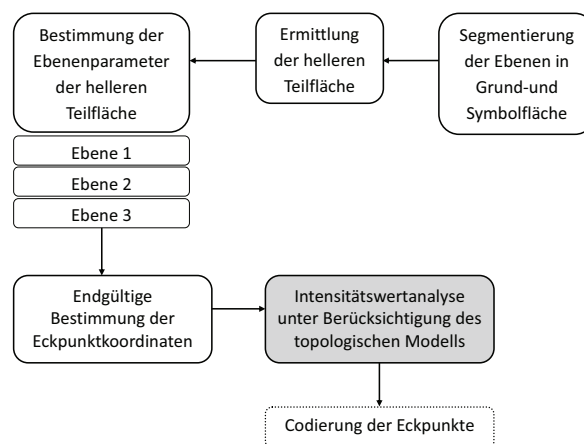


Abb. 7.4.1: Intensitätswertanalyse

Wie zuvor geschildert, stellt sich bei der Analyse der Intensitätswerte die starke Abhängigkeit des Intensitätswertes vom Auftreffwinkel des Laserstrahls auf die Ebene (Abb. 2.3.3) als besonders problematisch dar. Da alle drei Ebenen unter verschiedenen Auftreffwinkeln beobachtet werden, der die Reflexionswerte erheblich beeinflusst, können absolute Intensitätswerte nicht direkt einem Grauwert zugeordnet und die Intensitätswerte verschiedener Ebenen nicht direkt miteinander verglichen werden.

Der entwickelte Lösungsansatz stützt sich deshalb auf empirisch gewonnene Ergebnisse zur Analyse der Abhängigkeit des Intensitätswertes vom Auftreffwinkel und nutzt das festgelegte topologische Modell, um die Codierung der Eckpunkte zu ermitteln.

7.4.2 Bestimmung der Ebenencodierung durch Intensitätswertanalyse

7.4.2.1 Heller-dunkler-Relation

Die Betrachtungen aus Kap. 7.3.5.2 haben gezeigt, dass die heller-dunkler-Relation der Intensitätswerte der beiden Teilflächen einer Ebene bestehen bleibt, während die direkte Vergleichbarkeit der Intensitätswerte der Teilflächen unterschiedlicher Ebenen nicht gewährleistet ist. Auswertungen einer Stichprobe von über 50 Flächen stützen diese Beobachtungen. So liegt der Intensitätswert der dunkleren Teilfläche einer Ebene erwartungsgemäß unterhalb dem Wert der helleren Fläche, die Teilflächen desselben Grauwertes verschiedener Ebenen können jedoch sehr unterschiedliche Werte annehmen.

Begründen lässt sich dies mit dem Einfluss des Auftreffwinkels auf den Intensitätswert:

- Da die beiden Teilflächen einer Ebene näherungsweise denselben Auftreffwinkel des Laserstrahls besitzen, bleibt ihre heller-dunkler-Relation unbeeinflusst.
- Da die Teilflächen unterschiedlicher Ebenen mit identischem Grauwert unter sehr verschiedenen Auftreffwinkeln beobachtet werden, lassen sich ihre Intensitätswerte nicht miteinander vergleichen, sodass keine direkte Zuordnung von Intensitätswert zu Grauwert möglich ist.

Diese Tatsache ermöglicht es, einen relativen Bezug der Intensitätswerte zwischen Grund- und Symbolfläche einer Ebene herzustellen, und es kann ermittelt werden, welche der beiden Teilflächen heller oder dunkler ist (vgl. Kap. 7.3.5.2).

Damit liefert die relative Helligkeit zwischen Grund- und Symbolfläche ein zuverlässiges Kriterium, um bestimmte Kombinationsmöglichkeiten der Ebenenanordnung auszuschließen, und bildet zugleich eine erste Entscheidungsgrundlage für die automatisierte Ebenenerkennung.

Im Folgenden werden die Intensitätswerte der Grundflächen I_G in Relation zu denen der Symbolflächen I_S der jeweils identischen Ebenen betrachtet.

$$\Delta I = I_G - I_S \quad (7.4.1)$$

„Heller“ bedeutet in diesem Kontext, dass die Grundfläche einen höheren Intensitätswert als die Symbolfläche besitzt. Es gilt:

$$\Delta I > 0 \quad (7.4.2)$$

Für die heller-dunkler-Relation jeder Ebene wird ein Code verwendet. Ist (7.4.2) erfüllt, wird der Code 1 vergeben, bei einer dunkleren Grundfläche der Code 0. Durch die Analyse aller drei Ebenen entsteht ein dreistelliger Heller-dunkler-Code (HD-Code), der prinzipiell $2^3 = 8$ unterschiedliche Werte annehmen kann (Tab. 7.4.1). Durch den festgelegten Aufbau des Würfels entfallen allerdings die zwei Möglichkeiten, dass alle drei Grundflächen heller oder alle dunkler sind. Die Unterscheidbarkeit der einzelnen Codierungen wird wiederum durch die festgelegte Reihenfolge sichergestellt, entsprechend dem LG-Code gilt: Ebene 1 \equiv rechts, Ebene 2 \equiv links und Ebene 3 \equiv mittig.

Der Code 011 repräsentiert beispielsweise eine dunklere Grundfläche auf der rechten Ebene sowie eine hellere Grundfläche auf der linken und der mittigen Ebene. Durch Kenntnis der heller-dunkler-Relation kann direkt ein Rückschluss auf die potentiellen Ebenen gezogen werden. Ist die Grundfläche heller, kann die Ebene den Code 1, 2 oder 4 besitzen, bei dunklerer Grundfläche den Code 3, 5 oder 6.

Tab. 7.4.1: *Variationsmöglichkeiten der Helligkeitsrelation von Grund- und Symbolfläche*

Ebene 1	Ebene 2	Ebene 3	HD-Code
$\Delta I > 0$	$\Delta I > 0$	$\Delta I > 0$	111
$\Delta I > 0$	$\Delta I > 0$	$\Delta I < 0$	110
$\Delta I > 0$	$\Delta I < 0$	$\Delta I > 0$	101
$\Delta I < 0$	$\Delta I > 0$	$\Delta I > 0$	011
$\Delta I < 0$	$\Delta I < 0$	$\Delta I > 0$	001
$\Delta I < 0$	$\Delta I > 0$	$\Delta I < 0$	010
$\Delta I > 0$	$\Delta I < 0$	$\Delta I < 0$	100
$\Delta I < 0$	$\Delta I < 0$	$\Delta I < 0$	000

Durch den festgelegten Aufbau des Würfels gemäß seines topologischen Modells (Tab. 6.1.5) sind nur 24 Ebenenkombinationen – bei bekannter Würfelansicht [0 oder 1] – möglich: Ist die Lage der erfassten Ebenen zueinander bekannt, verbleiben bei Kenntnis des HD-Codes vier mögliche Lösungen für den gesuchten kombinierten Ebenencode (K-Code). Der K-Code ist vierstellig und setzt sich aus dem Code der Würfelansicht sowie den Ebenencodes der drei Ebenen in der Reihenfolge: Ebene rechts, Ebene links und Ebene mittig zusammen. Der Code der Würfelansicht spezifiziert dabei lediglich, ob die mittige Ebene ober- oder unterhalb der beiden anderen Ebenen liegt (Tab. 6.1.5).

Die Tabellen 7.4.2 und 7.4.3 zeigen jeweils zwei Beispiele für die möglichen Lösungen bei bekanntem HD-Code und bekannter Würfelansicht. Alle Lösungsmöglichkeiten sind im Anhang in Tab. A.1 und Tab. A.3, alternativ mit dem LG-Code in Tab. A.2 und Tab. A.4 dargestellt.

Abb. 7.4.2 gibt einen Überblick der verwendeten Codierungen und fasst das bisherige Vorgehen anhand eines Beispiels zusammen. Die ermittelten Parameter „Würfelansicht“, „Lage der Ebenen zueinander“ und „HD-Code“ im oberen Teil der Abbildung sind dabei grau hinterlegt, die zu bestimmenden Parameter „Ebenenencode“ bzw. „K-Code“ weiß. Ergänzend ist der LG-Code angegeben.

Tab. 7.4.2: *Mögliche Ebenencodierung bei bekannter heller-dunkler-Relation der Teilflächen (Würfelansicht 0)*

HD-Code	Würfelansicht 0			K-Code
	Ebene rechts	Ebene links	Ebene mittig	
110	Gs (4)	Wg (1)	Sw (5)	0415
	Ws (2)	Gs (4)	Sw (5)	0245
	Gs (4)	Ws (2)	Sg (6)	0426
	Wg (1)	Gs (4)	Sg (6)	0146
010	Sw (5)	Wg (1)	Gw (3)	0513
	Sg (6)	Ws (2)	Gw (3)	0623
	Gw (3)	Ws (2)	Sw (5)	0325
	Gw (3)	Wg (1)	Sg (6)	0316

Tab. 7.4.3: Mögliche Ebenencodierung bei bekannter heller-dunkler-Relation der Teilflächen (Würfelansicht 1)

HD-Code	Würfelansicht 1			K-Code
	Ebene rechts	Ebene links	Ebene mittig	
110	Gs (4)	Wg (1)	Sg (6)	1416
	Ws (2)	Gs (4)	Sg (6)	1246
	Gs (4)	Ws (2)	Sw (5)	1425
	Wg (1)	Gs (4)	Sw (5)	1145
010	Sw (5)	Ws (2)	Gw (3)	1523
	Sg (6)	Wg (1)	Gw (3)	1613
	Gw (3)	Ws (2)	Sg (6)	1326
	Gw (3)	Wg (1)	Sw (5)	1315

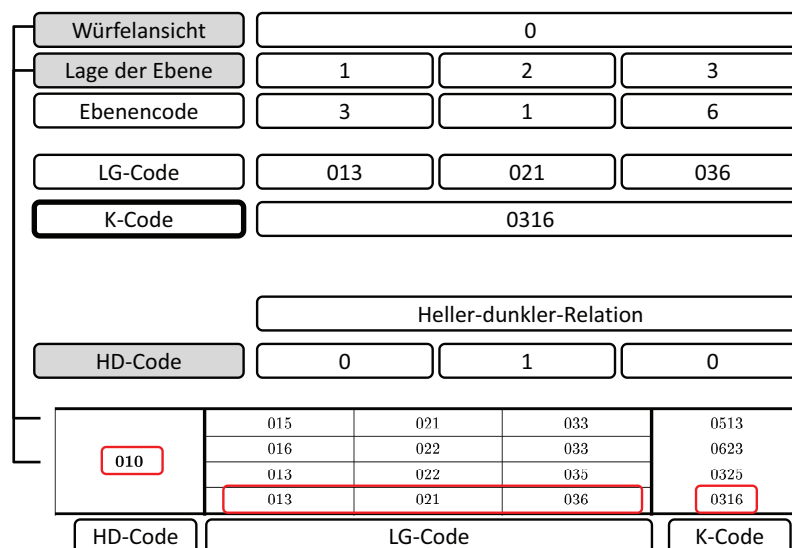


Abb. 7.4.2: Überblick der Codierungen

Durch die Ermittlung der obigen Parameter verbleiben die vier Lösungsmöglichkeiten für den gesuchten K-Code, die in Tabellen hinterlegt sind. Für die ermittelten Parameter ist in Abb. 7.4.2 der betreffende Tabellenausschnitt aus Tab. A.2 übernommen. Er beinhaltet in Zeile vier die Solllösung für den gesuchten K-Code.

7.4.2.2 Erweiterte Analyse der Intensitätswerte

Um die Solllösung aus den verbleibenden vier Möglichkeiten zu ermitteln, müssen weitere Regeln spezifiziert werden, die den Einfluss des Auftreffwinkels auf die Intensitätswerte berücksichtigen. Hierzu erfolgt die Auswertung einer Testreihe von drei unterschiedlichen Messtagen mit insgesamt 54 schwarzen sowie 56 grauen und 51 weißen Teilflächen im Entfernungsbereich bis 14m, durchgeführt im Messlabor mit dem Laserscanner HDS 6000. Für jede Teilfläche wird die Häufigkeitsverteilung ihrer Intensitätswerte bestimmt und der Klassenmittelwert der am meisten besetzten Klasse als Intensitätswert der Fläche

abgelegt. Werden diese ermittelten Werte in Abhängigkeit vom Auftreffwinkel dargestellt, ergibt sich Abb. 7.4.3, die die lineare Abhängigkeit der Intensitätswerte vom Auftreffwinkel für alle drei Grauwerte veranschaulicht.

Die Intensitätswerte werden mit zunehmendem Auftreffwinkel abgeschwächt, wobei sich dieser Effekt bei den weißen Flächen am stärksten zeigt. Für die Messwerte der unterschiedlichen Grauwerte kann demnach jeweils eine Regressionsgrade ermittelt werden, dargestellt in Abb. 7.4.4 mit einem Konfidenzintervall von 95%.

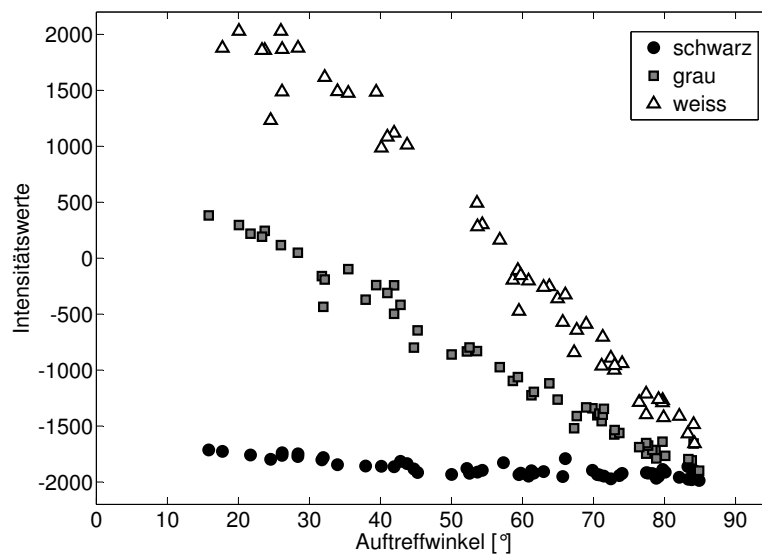


Abb. 7.4.3: Einfluss des Auftreffwinkels auf die Intensitätswerte

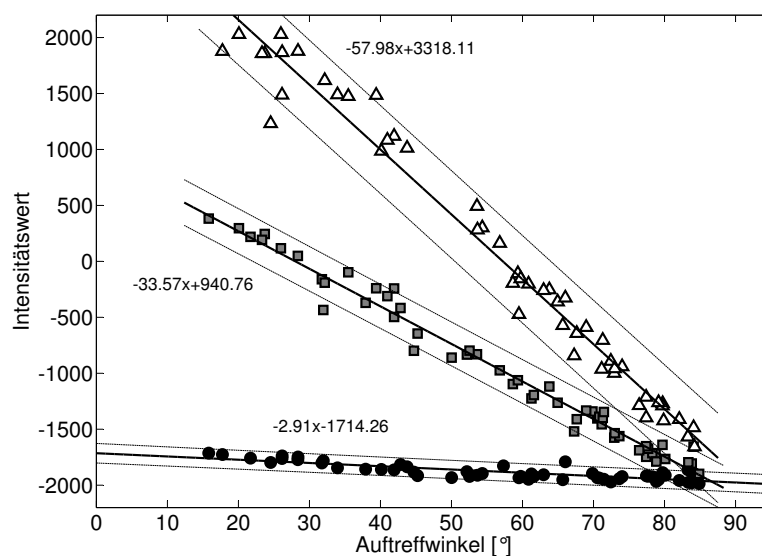


Abb. 7.4.4: Regressionsgeraden der Intensitätswerte der Testreihe (mit 95% Konfidenzintervall)

Es wird deutlich, dass sich die drei Regressionsgeraden bis zu einem Auftreffwinkel von 75° eindeutig voneinander trennen lassen, was eine Zuordnung der Grauwerte zu den einzelnen Flächen in diesem Wertebereich erlaubt und die Codierung der Ebenen in etwa 90% der Fälle ermöglicht.

7.4.2.3 Codierung der Eckpunkte

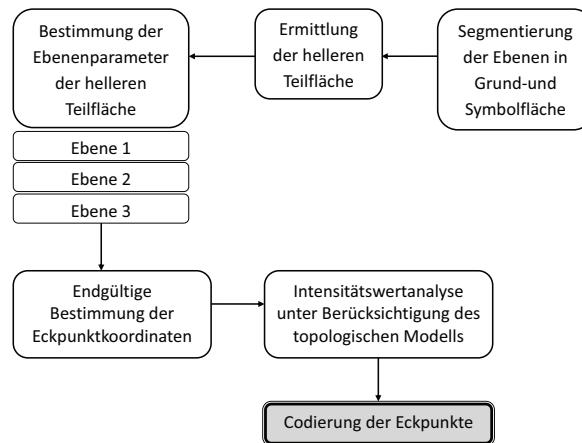


Abb. 7.4.5: Codierung der Eckpunkte

Folgende Fälle bei der Codierung der Eckpunkte werden unterschieden:

1. Alle drei Ebenen haben einen Auftreffwinkel $<75^\circ$.
In diesem Fall können die drei Ebenen direkt codiert und das topologische Modell zur Prüfung der Codierung verwendet werden.
2. Der Auftreffwinkel zweier Ebenen ist $<75^\circ$.
Es können zwei Ebenen direkt codiert werden. Die Codierung der dritten Ebene lässt sich durch das topologische Modell ermitteln.
3. Nur eine Ebene besitzt einen Auftreffwinkel $<75^\circ$.
Es kann nur eine Ebene direkt codiert werden, sodass die Lösung für die beiden anderen Ebenen nicht in allen Würfelausrichtungen eindeutig ist. In der Regel verbleiben zwei Lösungsmöglichkeiten für die Ausrichtung des Würfels im Raum.

Große Auftreffwinkel auf zwei Würfebenen können demnach die Würfelcodierung unmöglich machen und sollten deshalb vermieden werden (vgl. Kap. 7.2). Untersuchungen und alternative Lösungsmöglichkeiten werden in Kap. 8.1.2 thematisiert.

7.4.3 Ergebnisse

Nach erfolgreicher Codierung der Ebenen erhalten die Eckpunkte ihren daraus resultierenden Code. Abb. 7.4.6 zeigt die ursprünglich erfassten Ebenen sowie die berechneten Eckpunkte des Würfels mit der ermittelten Codierung.

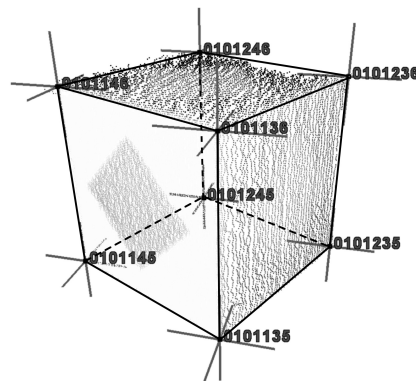


Abb. 7.4.6: Darstellung der Punktwolke des Würfels in Cyclone mit den berechneten Kanten und Eckpunkten

Tab. 7.4.4 stellt die Ergebnisse für den berechneten Würfel mit seinen theoretischen Punktfehlern – bei Annahme der Kantenunsicherheit von 1mm – dar. E_{f_x} , E_{f_y} , E_{f_z} bezeichnen dabei die Fehler der einzelnen Komponenten, $E_{f_{ges}}$ den Gesamtpunktfehler.

Tab. 7.4.4: Ergebnis nach abschließender Eckpunktcodierung

Pnr.	X [m]	Y [m]	Z [m]	E_{f_x} [mm]	E_{f_y} [mm]	E_{f_z} [mm]	$E_{f_{ges}}$ [mm]
101136	-4.7307	0.6296	-1.3287	0.0	0.0	0.0	0.1
101135	-4.7316	0.6297	-1.4287	0.0	0.1	1.0	1.0
101236	-4.8205	0.6736	-1.3266	0.9	0.4	0.1	1.0
101146	-4.7740	0.5395	-1.3283	0.4	0.9	0.1	1.0
101246	-4.8638	0.5834	-1.3263	0.5	1.3	0.1	1.4
101145	-4.7749	0.5395	-1.4283	0.4	0.9	1.0	1.4
101235	-4.8214	0.6736	-1.4266	0.9	0.4	1.0	1.4
101245	-4.8647	0.5834	-1.4263	0.5	1.3	1.0	1.7

Die ermittelten Fehlerkomponenten E_{f_x} , E_{f_y} , E_{f_z} (Konfidenzbereich 1σ) sind in Abb. 7.4.7 als Fehlerellipsoide der Würfeckpunkte mit einem Überhöhungsfaktor $f = 15$ bei der Würfelkantenlänge von $k_l = 100\text{mm}$ dargestellt. Hierbei wird sichtbar, dass die Fehlerellipsoide nahezu parallel zu den Achsen ausgerichtet sind. Dies ist auf die Vernachlässigung der Kovarianzen zurückzuführen. Werden die Kovarianzen berücksichtigt, können sich Lage und Form der Ellipsoide ändern.

Die Fehler der Komponenten einzelner Eckpunkte können sehr verschieden sein (vgl. Kap. 6.3.1 und 6.3.2). Der Gesamtfehler von Eckpunkt 135 wird beispielsweise nahezu ausschließlich von der z-Komponente E_{f_z} bestimmt.

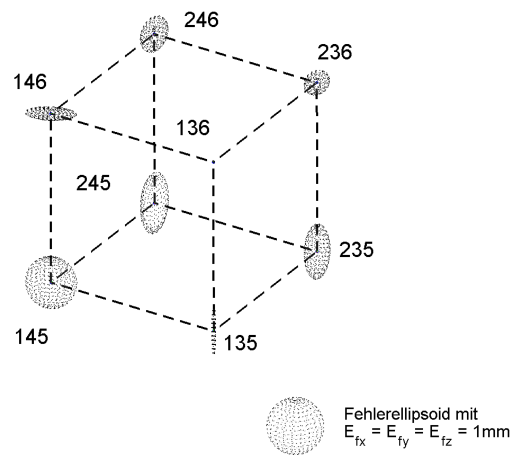


Abb. 7.4.7: Darstellung der Fehlerellipsoide der Eckpunkte

Nach der Berechnung und Codierung der Eckpunkte erfolgt gemäß Kap. 6.3.3 die abschließende Kontrolle des Würfels, indem die Strecken zwischen Eckpunkten, die eine Flächen- oder Raumdiagonale bilden (S_b), und ihre Abweichungen d_S von den Solllängen S_s , sowie die maximale Längenabweichung L_{max} und die mittlere Längenabweichung L_m bestimmt werden (Tab. 7.4.5).

Tab. 7.4.5: Kontrolle der Strecken zwischen den Eckpunkten

Eckpunkt E_1	Eckpunkt E_2	$S_s = E_1 - E_2$ [mm]	$S_b = E_{1b} - E_{2b}$ [mm]	$d_S = S_s - S_b$ [mm]
135	146	141.4	142.3	-0.9
135	236	141.4	141.4	0.0
135	245	141.4	140.9	0.5
136	145	141.4	140.5	0.9
136	235	141.4	141.4	0.0
136	246	141.4	140.9	0.5
145	235	141.4	142.0	-0.5
145	246	141.4	141.4	0.0
146	236	141.4	142.0	-0.5
146	245	141.4	141.4	0.0
235	246	141.4	142.3	-0.9
236	245	141.4	140.5	0.9
135	246	173.2	173.4	-0.2
136	245	173.2	172.1	1.1
145	236	173.2	172.9	0.3
146	235	173.2	174.4	-1.2

Für obiges Beispiel beträgt $L_m = 0.4\text{mm}$ und $L_{max} = 1.2\text{mm}$. Der modellierte Würfel zeigt damit nur geringe Abweichungen von der Sollgeometrie.

7.5 Registrierung der Scandaten

Nach erfolgreicher Bestimmung der Eckpunkte mehrerer identischer Würfel, die von unterschiedlichen Standpunkten aufgenommen wurden und sich somit auf verschiedene Koordinatensysteme beziehen, erfolgt die Registrierung der Scandaten auf Basis einer räumlichen, affinen Koordinatentransformation (Helmert-Transformation). Grundlage hierfür bildet die korrekte Zuordnung korrespondierender Punkte in den unterschiedlichen Koordinatensystemen.

Im Allgemeinen lässt sich eine räumliche, affine Koordinatentransformation mit

$$\mathbf{X}_t = T + m \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{X}_s = \begin{pmatrix} X_t \\ Y_t \\ Z_t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} + m \cdot \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{pmatrix} \quad (7.5.1)$$

formulieren.

Hierbei stellt \mathbf{X}_t den Punkt im Zielsystem, \mathbf{X}_s den Punkt im Ausgangssystem dar. Die Transformationsparameter \mathbf{T} und \mathbf{R} beschreiben die Translation und die Rotation des Ausgangssystems, um es in das Zielsystem zu transformieren. Der Parameter m stellt den Maßstab dar.

Vor der Durchführung der Helmert-Transformation werden die berechneten Eckpunkte aller Würfel, die von einem Standpunkt erfasst wurden, zu einer Datei pro Standpunkt zusammengefasst. Über die festgelegte Codierung der Eckpunkte erfolgt im Anschluss die notwendige Zuordnung korrespondierender Eckpunkte. Abb. 7.5.1 veranschaulicht beispielhaft die Korrespondenzherstellung zwischen dem Eckpunkt 101136 des ersten Würfels, aufgenommen vom ersten Standpunkt, und dem korrespondierenden Punkt 401136, aufgenommen vom vierten Standpunkt.

Tab. 7.5.1 zeigt die Ergebnisse der ermittelten Transformationsparameter für die Registrierung zweier Scannerstandpunkte mit vier Würfeln. Der Maßstab wird dabei auf 1.000 festgesetzt. Der Parameter m_0 bezeichnet die Standardabweichung der Gewichtseinheit.

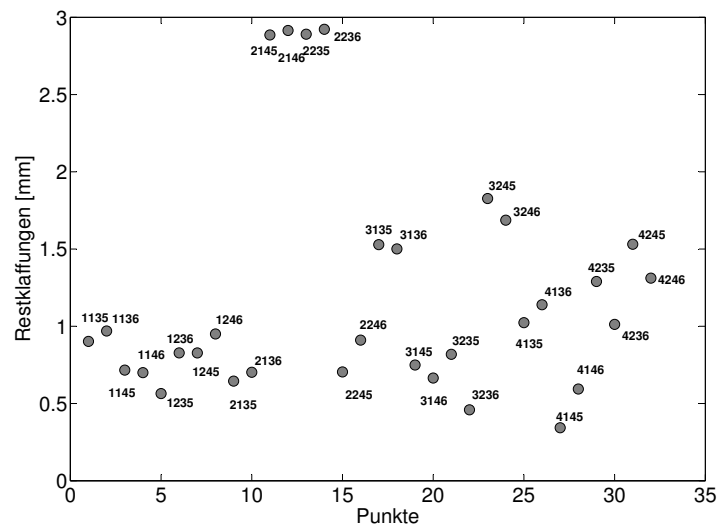
101246	-4.35566 -2.01032 -1.34132
101245	-4.35688 -2.00985 -1.44131
101146	-4.44495 -1.96530 -1.34021
101236	-4.40040 -2.09975 -1.34025
101136	-4.48968 -2.05473 -1.33914
101235	401136 1.20202 -3.09545 -1.33212
101145	401135 1.20283 -3.09477 -1.43212
101135	401236 1.22522 -3.19272 -1.33255
102236	401146 1.29923 -3.07202 -1.33270
102235	401246 1.32243 -3.16929 -1.33312
102246	401145 1.30005 -3.07134 -1.43269
102136	401235 1.22603 -3.19204 -1.43254
102146	401245 1.32325 -3.16861 -1.43312
102135	402246 -1.21930 -5.92743 -1.32912
102245	402245 -1.21849 -5.92738 -1.42911
102145	402146 -1.25886 -6.01927 -1.32949
	402236 -1.12771 -5.96750 -1.32717
	402136 -1.16726 -6.05934 -1.32754
	402235 -1.12689 -5.96746 -1.42717
	402145 -1.25804 -6.01923 -1.42948
	402135 -1.16645 -6.05930 -1.42754

Abb. 7.5.1: Zuordnung der ermittelten Eckpunkte über die Codierung

Tab. 7.5.1: *Ergebnisse der Helmert-Transformation mit vier Würfeln (32 Passpunkten)*

Parameter	W 1+2+3+4
X_0 [m]	-7.637 ± 0.000
Y_0 [m]	-0.993 ± 0.000
Z_0 [m]	-0.009 ± 0.000
m	1.000
ω [°]	0.027 ± 0.006
ϕ [°]	-0.029 ± 0.005
κ [°]	50.109 ± 0.003
m_0 [mm]	1.0

Die Restklaffungen der Punkte sind in Abb. 7.5.2 dargestellt. Details zur Berechnung der Transformationsparameter sind Anhang B zu entnehmen.

**Abb. 7.5.2:** *Restklaffungen nach Transformation mit vier Würfeln*

Im nachfolgenden Kapitel folgen unterschiedliche Untersuchungen zur Berechnung der Würfeckpunkte sowie die Gegenüberstellung der Ergebnisse der Registrierung mit unterschiedlichen Verfahren.

8 Praktische Untersuchungen

8.1 Einflussfaktoren auf die Genauigkeit der Würfeckpunktbestimmung

Die Genauigkeit, mit der sich die Würfeckpunkte berechnen lassen, richtet sich nach der Bestimmungsgenauigkeit der Normalenvektoren der Ebenen sowie der Fertigungstoleranz des Würfels.

In Kap. 2.3 sind die allgemeinen Einflussfaktoren auf die Messgrößen des Laserscannings bereits benannt worden. Diese sind demnach auch für die Bestimmung der Würfeckpunkte von Bedeutung:

- Scannerspezifische Eigenschaften → Divergenz des Laserstrahls
- Oberflächeneigenschaften der Ebene, u.a. Grauwert der Ebene → Reflexionsverhalten
- Ausrichtung des Würfels zum Scanner → Auftreffwinkel
- Entfernung des Würfels zum Scanner und gewählte Auflösungsstufe → Punktzahl
- Fertigungsgenauigkeit des Würfels

Die Einflussfaktoren müssen dabei in einem Gesamtkontext betrachtet werden, wobei sich die aufnahmebedingten Einflüsse, wie Entfernung, Ausrichtung und Auflösungsstufe, im Hinblick auf Unterschiede untersuchen lassen.

Als Maß für die Bestimmungsgenauigkeit der einzelnen Ebenen werden ihre Standardabweichungen der Gewichtseinheit s_0 verwendet. Für die Genauigkeit der Würfeckpunkte liefern die Schnittwinkel der Normalenvektoren bzw. ihre Abweichungen vom Sollwert 90° sowie die maximale (L_{max}) und mittlere Längenabweichung (L_m) der Flächen- und Raumdiagonalen eine geeignete Beschreibungsgröße (vgl. Kap. 6.3.3). Die Auswertung von 50 Würfeln ergab keine Systematiken bezüglich der maximalen Längenabweichung $L_{max} < 0$ oder $L_{max} > 0$. L_{max} ist deshalb in den nachfolgenden Betrachtungen gemäß (6.3.13) als absolute Größe definiert.

8.1.1 Auflösungsstufe und Entfernung

Zur Bestimmung des Einflusses der Aufnahmekonfiguration auf die berechnete Würfelgeometrie erfolgt die Auswertung mehrerer in verschiedenen Abständen, Auflösungen und Ausrichtungen gescannter Würfel. Zunächst wird die Würfelgeometrie im Hinblick auf die Auflösungsstufe untersucht. Hierzu erfolgt die Analyse identischer Würfel, die im ersten Fall mit einer Auflösung von 0.009° (ultrahigh), im zweiten Fall mit einer Auflösung von 0.018° erfasst wurden. Die Würfel befanden sich auf dem Boden, sodass die obere Ebene nahezu parallel zur X-Y-Ebene des Scanners ausgerichtet war.

Tab. 8.1.1 gibt exemplarisch die Ergebnisse dreier Würfel wieder, die etwa 5m, 10m und 12m vom Aufnahmestandpunkt entfernt lagen. Die Ergebnisse der niedrigeren Auflösungsstufe sind dabei jeweils mit einem Stern (*) gekennzeichnet. Die Abkürzungen „mo“, „ru“, „lu“ sowie „mu“, „ro“, „lo“ definieren in Anlehnung an Kap. 6.1.2 die Ebenenlage: „mittig oben“, „rechts unten“, „links unten“ sowie „mittig unten“, „rechts oben“, „links oben“.

Es ist zu erkennen, dass die maximale und mittlere Längenabweichung bei geringerer Auflösungsstufe in allen drei Fällen einen höheren Betrag aufweist. Vor allem bei Würfel 513 und 245 treten hohe Abweichungen aufgrund der geringen Punktzahl (< 100) der Ebene „mo“ auf. Weitere Auswertungen stützen diese Beobachtung (s. Anhang Tab. E.1).

Tab. 8.1.1: Gegenüberstellung unterschiedlicher Auflösungsstufen bei 5m, 7m und 12m

Würfelcode	Ebene	Auftreffwinkel [°]	Punktanzahl		s ₀ [mm]		L _m [mm]		L _{max} [mm]	
154 (5m)	ru	34	9280	2295*	0.5	0.5*	0.4	0.6*	0.8	1.0*
	lu	62	1409	345*	0.4	0.3*				
	mo	74	2554	611*	0.7	1.0*				
513 (10m)	ru	68	273	68*	0.5	0.5*	1.4	2.1*	2.9	4.3*
	lu	22	2448	586*	0.7	0.7*				
	mo	84	104	59*	0.6	1.2*				
245 (12m)	ru	50	1165	262*	0.7	0.7*	1.6	2.5*	3.3	5.3*
	lu	43	1441	353*	1.0	1.1*				
	mo	86	96	38*	0.8	1.4*				

Tendenziell steigt mit zunehmender Entfernung die maximale und die mittlere Längenabweichung an, wobei zwischen Würfeln gleicher Entfernung Schwankungen in L_m von ca. 1mm auftreten können (vgl. Tab. E.1). In größeren Entfernungen zeigen sich vor allem bei der Bestimmung der Würfeldeckelfläche größere Standardabweichungen der Gewichtseinheit s_0 , da der Auftreffwinkel sehr große Werte annimmt und die Ebene nur mit einer geringen Punktzahl erfasst wird.

Zugleich fällt auf, dass sich die Standardabweichungen der Gewichtseinheit einzelner Würfebenen unterscheiden. Zu erwarten wäre, dass bei gleichem Auftreffwinkel und größerer Punktzahl – beim direkten Vergleich einer Ebenenteilfläche – s_0 geringere Werte aufweist. Zumeist sind die Werte jedoch unabhängig von der Punktzahl. Erst bei weniger als 100 Punkten sind größere Unterschiede zwischen den Standardabweichungen der Gewichtseinheit der verschiedenen Auflösungsstufen sichtbar (Ebene “mo“ des Würfels 513 und 245 in Tab. 8.1.1).

Des Weiteren liegt die Vermutung nahe, dass s_0 bei größerem Auftreffwinkel zunimmt. Dies ist jedoch nicht zwangsläufig gegeben. Für eine genauere Analyse muss berücksichtigt werden, welche Teilfläche (grau oder weiß, Innen- oder Außenfläche) zur Berechnung von s_0 verwendet wird. Dies erfolgt im Rahmen der Analyse der Ausrichtung des Würfels zum Scanner im nachfolgenden Kapitel.

8.1.2 Ausrichtung des Würfels zum Scanner

Nachfolgend wird untersucht, ob die Würfelausrichtung die Ergebnisse für die mittlere und maximale Längenabweichung beeinflusst.

Bezüglich der Ausrichtung von Würfel zu Scanner werden gemäß Kap. 5.3.1 die zwei Fälle unterschieden:

1. Würfel befindet sich auf dem Boden oder einer sonstigen horizontalen Ebene, d.h. er liegt mit einer Ebene auf (Abb. 5.3.1 (c)).
2. Würfel ist auf einem Adapter gelagert (Abb. 5.3.1 (b)), in den nachfolgenden Tabellen mit [AD] gekennzeichnet.

Tab. 8.1.2 stellt die Ergebnisse der Auswertungen mehrerer Würfel dar, die aus unterschiedlichen Entfernungen gescannt wurden. Die Abkürzungen (i) und (a) beschreiben, ob die innere (i) oder die äußere (a) Teilfläche zur Berechnung verwendet wurde.

Tab. 8.1.2: *Mittlere und maximale Längenabweichung gescannter Würfel mit unterschiedlicher Ausrichtung und Entfernung*

Würfelcode	Ebene	Auftreffwinkel [°]	Punktzahl	s_0 [mm]	L_m [mm]	L_{max} [mm]
631 (3.4m)	ru	64	671 (i)	0.4	0.2	0.4
	lu	37	1224 (i)	0.4		
	mo	68	1773 (a)	0.3		
135 (3.4m)	ru	55	3472 (a)	0.4	0.2	0.3
	lu	46	1193 (i)	0.4		
	mo	67	662 (i)	0.3		
315 (3.4m) [AD]	ro	64	761 (i)	0.4	0.3	0.7
	lo	42	4747 (a)	0.4		
	mu	61	871 (i)	0.3		
351 (9.4m)	ru	62	404 (i)	0.4	0.2	0.4
	lu	30	718 (i)	0.6		
	mo	81	496 (a)	0.7		
264 (9.4m)	ru	35	2601 (a)	0.6	1.1	2.2
	lu	57	480 (i)	0.7		
	mo	82	422 (a)	0.6		
264 (9.4m)	ru	63	1361 (a)	0.6	0.8	1.3
	lu	29	726 (i)	0.7		
	mo	83	360 (a)	0.7		
426 (9.4m)	ru	37	2585 (a)	1.0	1.0	2.0
	lu	55	1640 (a)	0.6		
	mo	82	302 (i)	0.8		
154 (9.4m) [AD]	ru	80	520 (a)	0.9	1.2	2.2
	lu	73	263 (i)	0.5		
	mo	19	2946 (a)	0.8		
415 (9.4m) [AD]	ru	75	699 (a)	0.9	1.0	1.7
	lu	60	1412 (a)	0.6		
	mo	35	685 (i)	0.5		
245 (12.7m)	ru	27	1448 (a)	0.8	2.7	4.5
	lu	66	655 (a)	1.0		
	mo	86	86 (i)	0.8		
362 (12.7m)	ru	35	371 (i)	0.6	3.0	4.8
	lu	56	251 (i)	0.9		
	mo	86	131 (a)	1.2		
614 (12.7m) [AD]	ru	71	146 (i)	0.7	1.0	1.9
	lu	68	533 (a)	0.9		
	mo	31	1331 (a)	1.2		
325 (12.7m) [AD]	ru	68	177 (i)	0.6	1.0	2.1
	lu	70	479 (a)	0.9		
	mo	33	370 (i)	0.7		

Es wird deutlich, dass die mittlere und maximale Längenabweichung unabhängig von der Ausrichtung für Entfernungen bis 10m ist. Für die Entfernung von 12.7m werden bei der Lagerung auf dem Adapter etwas bessere Ergebnisse erhalten. Weitere Auswertungen (vgl. Tab. 8.1.5, Würfel 614) zeigen allerdings, dass dies nicht immer der Fall ist. Auch bei Lagerung des Würfels auf dem Adapter können große Auftreffwinkel durch die Verkipfung einer Ebene auftreten, welche die Ergebnisse negativ beeinflussen können.

Insgesamt lässt sich keine allgemeingültige Aussage darüber treffen, ob die Lagerung des Würfels auf dem Adapter prinzipielle Vorteile bietet. Für die erreichbare Genauigkeit spielen neben den Auftreffwinkeln auf die Ebenen die zur Berechnung verwendeten Teilflächen eine Rolle. Bei der weiteren Ergebnisanalyse hat sich gezeigt, dass Außenflächen zumeist schlechter bestimmt werden. Sie weisen eine höhere Standardabweichung der Gewichtseinheit auf. Die geringsten Längenabweichungen treten zumeist dann auf, wenn zwei Innenflächen und nur eine Außenfläche zur Würfelberechnung verwendet werden. Die Ursache hierfür könnte in einer ungenauen Abgrenzung der Außen- bzw. Grundfläche liegen, sodass Punkte im Randbereich der jeweiligen Ebene zur Ebenenschätzung verwendet werden, die ein höheres Messrauschen aufweisen.

Abb. 8.1.1 zeigt zwei Punktwolken von Würfeln, die aus einer Entfernung von etwa 7m gescannt wurden. Hierbei ist eine ungleichmäßige Verteilung der Punkte auf der rechten Ebene von Würfel 641 (Abb. 8.1.1 (a)) deutlich erkennbar, die durch den großen Auftreffwinkel verursacht wird. Obwohl für die spätere Berechnung nur die graue Teilfläche der rechten Ebene von Würfel 641 verwendet wird, schlägt sich dies in den Schnittwinkeln der Normalenvektoren (Tab. 8.1.3) und den Längenabweichungen von der Sollgeometrie (Tab. 8.1.4) nieder.

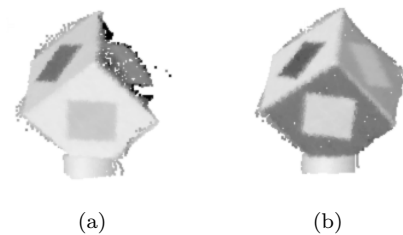


Abb. 8.1.1: Erfasste Scanpunkte für zwei unterschiedliche Würfel in ca. 7m Entfernung – (a) Würfel 641 – (b) Würfel 326

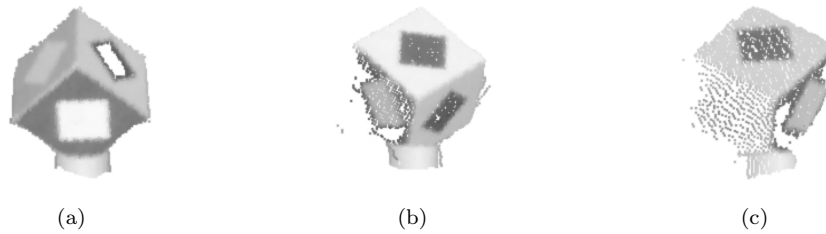
Tab. 8.1.3: Schnittwinkel zwischen den berechneten Kanten der beiden Würfel

Kante	Schnittwinkel [°]	
	641	326
$n_2 \times n_3 \triangleleft n_1 \times n_3$ -> $n_1 \triangleleft n_2$	91.00	90.25
$n_2 \times n_3 \triangleleft n_1 \times n_2$ -> $n_1 \triangleleft n_3$	90.63	90.43
$n_1 \times n_3 \triangleleft n_1 \times n_2$ -> $n_2 \triangleleft n_3$	90.37	90.24

Tab. 8.1.4: Bestimmung der Längenabweichungen zweier Würfel auf Adapter in 7m Entfernung

Würfelcode	Ebene	Auftreffwinkel [°]	Punktzahl	s_0 [mm]	L_m [mm]	L_{max} [mm]
641 (7m) [AD]	ro	80	255 (i)	0.4	1.0	2.0
	lo	41	4315 (a)	0.8		
	mu	50	3211 (a)	0.6		
326 (7m) [AD]	ro	76	376 (i)	0.3	0.4	0.9
	lo	54	3141 (a)	0.5		
	mu	39	1222 (i)	0.6		

Weitere Beispiele sind in Abb. 8.1.2 veranschaulicht.

**Abb. 8.1.2:** Erfasste Scanpunkte für unterschiedliche Würfel – (a) Würfel 235 und (b) Würfel 452 in ca. 9.6m Entfernung – (c) Würfel 614 in 12m Entfernung

Würfel 452 (Abb. 8.1.2 (b)) zeigt im Vergleich zu Würfel 235 (Abb. 8.1.2 (a)) trotz gleicher Entfernung größere Abweichungen. Dies äußert sich sowohl in den Schnittwinkeln der Normalenvektoren (Tab. 8.1.6), als auch in den mittleren und maximalen Längenabweichungen (Tab. 8.1.5). Würfel 614 (Abb. 8.1.2 (c)) verdeutlicht die Schwierigkeiten der Ebenenerfassung bei Entfernungen $>10\text{m}$. Für die linke und rechte Ebene kann nur eine geringe Punktzahl erfasst werden.

Tab. 8.1.5: Bestimmung der Längenabweichungen dreier Würfel auf Adapter

Würfelcode	Ebene	Auftreffwinkel [°]	Punktzahl	s_0 [mm]	L_m [mm]	L_{max} [mm]
235 (9.6m) [AD]	ro	68	1031 (a)	0.8	1.0	1.8
	lo	70	269 (i)	0.5		
	mu	31	665 (i)	0.6		
452 (9.6m) [AD]	ru	57	1405 (a)	0.9	2.1	3.7
	lu	73	231 (i)	0.6		
	mo	38	2262 (a)	0.8		
614 (12m) [AD]	ru	54	298 (i)	0.9	2.4	4.7
	lu	83	241 (a)	1.2		
	mo	39	1264 (a)	1.4		

Tab. 8.1.6: *Schnittwinkel zwischen den berechneten Kanten von drei Würfeln*

Kante	Schnittwinkel [°]		
	235	452	614
$n_2 \times n_3 \triangleleft n_1 \times n_3 \rightarrow$ $n_1 \triangleleft n_2$	90.92	92.41	88.92
$n_2 \times n_3 \triangleleft n_1 \times n_2 \rightarrow$ $n_1 \triangleleft n_3$	89.14	89.75	88.89
$n_1 \times n_3 \triangleleft n_1 \times n_2 \rightarrow$ $n_2 \triangleleft n_3$	89.99	91.08	87.41

8.1.3 Beurteilung der Würfelgenauigkeit

Während der Auswertung jedes Würfels lässt sich seine Geometrie auf grobe Fehler prüfen, und es kann eine Genauigkeitsaussage zur Modellierung des jeweiligen Würfels getroffen werden. Als Beschreibungsgrößen werden die mittleren und maximalen Längenabweichungen der Flächen- und Raumdiagonalen verwendet. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass diese Abweichungen zwischen einzelnen Aufnahme-konfigurationen (bei gleicher Entfernung) in einem Schwankungsbereich von 1-2mm liegen können.

Am geeignetsten ist die Unterteilung in unterschiedliche Entfernungsbereiche mit der Angabe der beiden maximalen Längenabweichungen (Tab. 8.1.7).

Tab. 8.1.7: *Ermittelte Längenabweichungen bei unterschiedlichen Entfernungen*

Entfernungsbereich	Längenabweichungen [mm]	
	L_m	L_{max}
0-5m	$\leq 1\text{mm}$	$\leq 2\text{mm}$
5-10m	$\leq 2.5\text{mm}$	$\leq 4\text{mm}$
10-14m	$\leq 3\text{mm}$	$\leq 6\text{mm}$

Die Auswertungen haben zudem eine Abhängigkeit vom Auftreffwinkel gezeigt. Hohe Auftreffwinkel in Kombination mit großen Entfernungen sorgen für eine geringe Punktzahl. Die erfassten Punkte sind zudem oftmals ungleichmäßig über die Fläche verteilt (s. Abb. 8.1.2 (b) und Abb. 8.1.2 (c)) und weisen ein höheres Messrauschen auf.

Für Entfernungen $>14\text{m}$ lassen sich die Würfel zumeist nicht mehr bestimmen. Die Ebenen werden aufgrund mangelnder Reflexion mit zu wenigen Punkten erfasst, die zudem über ein hohes Messrauschen verfügen. Somit ergeben sich für die Schnittwinkel der Normalenvektoren Abweichungen zum Sollwinkel von mehr als $\pm 3^\circ$, die Längenabweichungen von $>5\text{mm}$ hervorrufen können. Dies erklärt den in Kap. 7.3.1 festgelegten Schwellwert.

Die angegebenen Werte basieren auf der Auswertung von 8 Würfeln im Entfernungsbereich bis 5m, 35 Würfeln im Entfernungsbereich 5-10m und 11 Würfeln bei Aufnahmeentfernungen größer 10m. Der Höchstabstand, mit dem sich die Würfel dieses Prototyps erfassen lassen, liegt bei etwa 13-14m. Bei größeren Entfernungen müsste der Würfel entsprechend vergrößert werden, um eine Erfassung mit ausreichender Punktzahl sicherzustellen. Weitere Möglichkeiten bestehen in einem andersartigen Adapter, der nur eine leichte Verkipfung hervorruft, oder der Lagerung des Würfels auf einer adaptierten Bodenfläche.

Der Würfel lässt sich demnach mit einer hohen (inneren) Genauigkeit aus der Punktwolke modellieren.

Seine absolute räumliche Lage hängt von der ermittelten Koordinate des ersten Eckpunktes ab. Für diesen Eckpunkt ist zu berücksichtigen, dass sich seine tatsächliche Bestimmungsgenauigkeit nach der Genauigkeit der Distanzmessung des verwendeten Scanners richtet.

8.2 Registrierung der Scandaten mit Hilfe der Würfel

8.2.1 Allgemein

In diesem Kapitel erfolgt die Bestimmung der Transformationsparameter mit unterschiedlicher Würfelanzahl sowie die Gegenüberstellung der Ergebnisse mit den Resultaten der Registrierung mit Kugeln (K) und Black- and White-Targets (BW). Die verwendeten BW-Targets besitzen in beiden Berechnungsbeispielen einen Durchmesser von ca. 150mm, die Kugeln im Berechnungsbeispiel I einen Durchmesser von 76mm, im Berechnungsbeispiel II 152mm.

Da für die Bestimmung der Transformationsparameter die Anordnung der Passkörper und Zielmarken von Bedeutung ist, werden für den Ergebnisvergleich der unterschiedlichen Verfahren Targets verwendet, die in etwa dieselbe Aufnahmekonfiguration aufweisen. Alle Messungen erfolgen im Innenbereich mit dem Laserscanner HDS 6000. Zur Beurteilung der Genauigkeit der unterschiedlichen Verfahren werden abschließend definierte Punkte des Ausgangssystems mit Hilfe der Transformationsparameter ins Zielsystem transformiert und die Abweichungen zu ihrer Sollpunktlage (gemessen im Zielsystem) bestimmt (Berechnungsbeispiel II – Kap. 8.2.2.2).

8.2.2 Berechnungsbeispiele

8.2.2.1 Berechnungsbeispiel I: Berechnung der Transformationsparameter mit unterschiedlicher Würfelanzahl und Vergleich der Registrierverfahren

Im Rahmen einer ersten Testmessung erfolgt die Aufnahme von sechs Würfeln, zehn Black- and White-Targets und sechs Kugeln von vier Standpunkten (S_1, S_2, S_3, S_4). Abb. 8.2.1 zeigt ein Kamerabild der Aufnahmeszene, Abb. 8.2.2 gibt einen Scanausschnitt mit den Positionen der Targets von Standpunkt S_1 wieder.

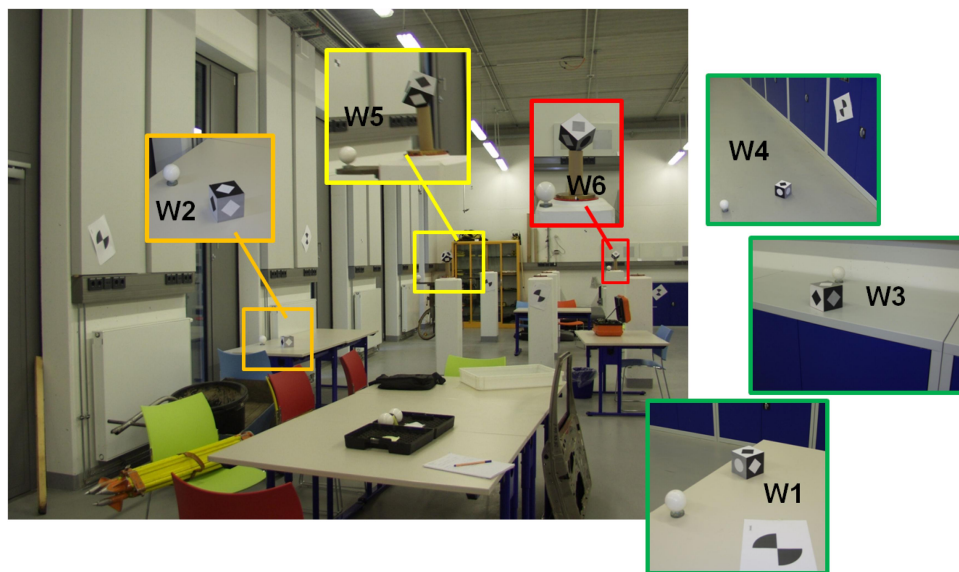


Abb. 8.2.1: Würfelanordnung des Berechnungsbeispiels I

Von den vier Standpunkten wurden insgesamt 24 Würfel mit dem Laserscanner aufgenommen. Nach Anwendung des entwickelten Algorithmus ließen sich die in Tab. 8.2.1 dargestellten 17 Würfel mit ihrer Codierung bestimmen. Aufgrund einer – während der Auswertung nachgewiesenen – fehlerhaften Codierung konnten für Würfel W4 keine Eckpunkte ermittelt werden. Bei den restlichen drei Würfeln ließ sich keine Codierung vornehmen, da zwei der drei Würfelebenen mit einem Auftreffwinkel $> 75^\circ$ beobachtet wurden.

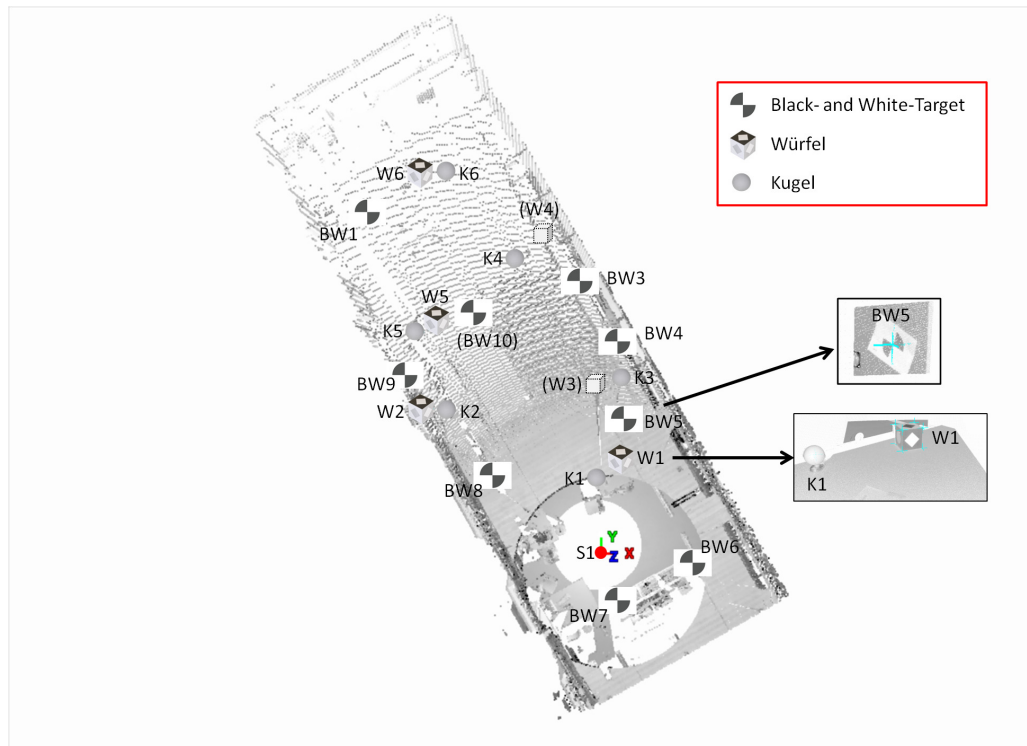



















Abb. 8.2.2: Anordnung der eingesetzten Black- and-White-Targets, Kugeln und Würfel (Berechnungsbeispiel I)

Tab. 8.2.1: Identifizierte Würfel pro Standpunkt (Berechnungsbeispiel I)

Würfel-ID	Detektierte Würfel			
	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄
W1				
W2				
W3				
W4	nicht verwendbar			
W5				
W6				
Anzahl	4	5	4	4

Eine schematische Ansicht der Würfelanordnung während der Messung für die beiden Standpunkte S₁ und S₂ zeigt Abb. 8.2.3. Hierbei sind zusätzlich die Schrägstrecken vom jeweiligen Scannerstandpunkt zu

den einzelnen Würfeln angegeben. Die Ergebnisse für die Transformation von S_2 nach S_1 sind in Tab. 8.2.2 dargestellt.

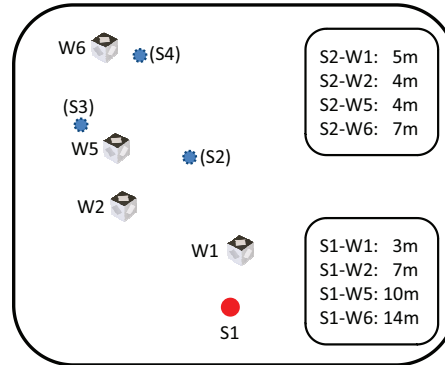


Abb. 8.2.3: Schematische Anordnung, der zur Transformation verwendeten Würfel

Tab. 8.2.2: Ergebnisse der Transformation der Standpunkte S_1 und S_2 mit unterschiedlicher Würfelanzahl

Parameter	W1	W1+2	W1+2+5	W1+2+5+6
X_0 [m]	-2.119 ± 0.017	-2.107 ± 0.001	-2.107 ± 0.000	-2.107 ± 0.000
Y_0 [m]	7.340 ± 0.010	7.335 ± 0.002	7.337 ± 0.000	7.336 ± 0.000
Z_0 [m]	-0.075 ± 0.019	-0.005 ± 0.010	-0.012 ± 0.001	-0.012 ± 0.000
m	1.000			
ω [°]	359.309 ± 0.208	0.107 ± 0.163	0.008 ± 0.010	0.003 ± 0.004
φ [°]	-0.146 ± 0.208	-0.010 ± 0.041	0.023 ± 0.005	0.027 ± 0.004
κ [°]	337.840 ± 0.201	337.705 ± 0.004	337.712 ± 0.003	337.712 ± 0.002
m₀ [mm]	0.7	0.8	0.9	1.0
Passpunkte	8	16	24	32

Die Auswertung mit unterschiedlicher Würfelanzahl erfolgt, um die Veränderungen in den Transformationsparametern sichtbar zu machen. Eine Gewichtung der Eckpunkte nach ihrer Entfernung findet nicht statt. Es zeigt sich, dass bereits mit nur einem Würfel, der acht Passpunkte liefert, gute Näherungslösungen für die gesuchten Transformationsparameter erhalten werden können. Zudem nehmen die Standardabweichungen der Unbekannten mit zunehmender Würfelanzahl ab, und beim Einsatz von drei Würfeln stabilisieren sich die Ergebnisse.

Abb. 8.2.4 zeigt die Restklaffungen der zur Transformation verwendeten Eckpunkte beim Einsatz von vier Würfeln. Die Eckpunkte des Würfels W6 weisen die größten Restklaffungen auf. Dies lässt sich mit seiner geringeren Bestimmungsgenauigkeit erklären: Aufgrund der relativ großen Aufnahmeentfernung von 14m zeigt der entsprechende Würfel eine mittlere Längenabweichung von 2.5mm, die maximale Längenabweichung liegt bei 5mm.

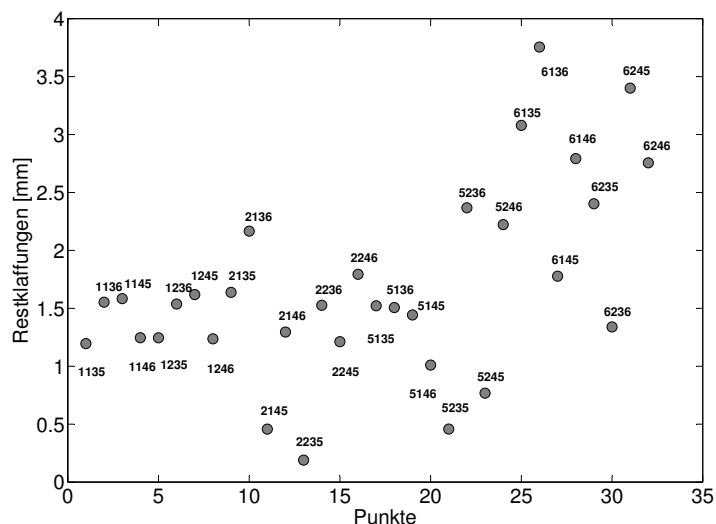


Abb. 8.2.4: Restklaffungen der Eckpunkte nach Transformation mit vier Würfeln (Berechnungsbeispiel I)

Für eine Gegenüberstellung der Ergebnisse der verschiedenen Registrierverfahren erfolgt im Anschluss zum einen die separate Auswertung mit Hilfe der Black- und White-Targets, zum anderen mit den Kugeln. Tab. 8.2.3 zeigt die Ergebnisse der Registrierung von Standpunkt S_1 und Standpunkt S_2 , wobei alle zur Verfügung stehenden Targets verwendet werden.

Tab. 8.2.3: Gegenüberstellung der Ergebnisse der Transformation von S_2 nach S_1 berechnet mit vier Würfeln, acht Black- and White-Targets bzw. sechs Kugeln

Parameter	W 1+2+5+6	BW 3-10	K 1-6
X_0 [m]	-2.107 ± 0.000	-2.107 ± 0.000	-2.108 ± 0.002
Y_0 [m]	7.336 ± 0.000	7.337 ± 0.000	7.345 ± 0.002
Z_0 [m]	-0.012 ± 0.000	-0.013 ± 0.000	-0.012 ± 0.002
m	1.000		
ω [°]	0.003 ± 0.004	0.007 ± 0.004	0.007 ± 0.046
ϕ [°]	0.027 ± 0.004	0.017 ± 0.004	0.036 ± 0.044
κ [°]	337.712 ± 0.002	337.710 ± 0.002	337.733 ± 0.028
m_0 [mm]	1.0	0.7	5.4
Passpunkte	32	8	6

Die mittels Registrierung der Kugeln bestimmten Parameter zeigen deutlich größere Standardabweichungen, während die Ergebnisse der Black- und White-Targets und Würfel nahezu identische Ergebnisse liefern.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der mit drei Würfeln berechneten Transformationsparameter den mit einer unterschiedlichen Anzahl an BW-Targets ermittelten Resultaten gegenübergestellt (Tab. 8.2.4). Die drei BW-Targets besitzen in etwa eine identische räumliche Verteilung wie die drei verwendeten Würfel (s. Abb. 8.2.2).

Tab. 8.2.4: Gegenüberstellung der Ergebnisse der Transformation von S_2 nach S_1 mit drei Würfeln bzw. unterschiedlicher Anzahl an Black- and White-Targets

Parameter	W 1+2+5	BW 5+9+10	BW 3+5+9+10	BW 3-10
\mathbf{X}_0 [m]	-2.107 ± 0.000	-2.107 ± 0.001	-2.107 ± 0.001	-2.107 ± 0.000
\mathbf{Y}_0 [m]	7.337 ± 0.000	7.337 ± 0.001	7.337 ± 0.001	7.337 ± 0.000
\mathbf{Z}_0 [m]	-0.012 ± 0.001	-0.012 ± 0.001	-0.013 ± 0.001	-0.013 ± 0.000
\mathbf{m}	1.000			
ω [°]	0.008 ± 0.010	0.014 ± 0.033	359.994 ± 0.010	0.007 ± 0.004
ϕ [°]	0.023 ± 0.005	0.012 ± 0.011	0.017 ± 0.007	0.017 ± 0.004
κ [°]	337.712 ± 0.003	337.700 ± 0.010	337.706 ± 0.006	337.710 ± 0.002
\mathbf{m}_0 [mm]	0.9	1.0	0.8	0.7
Passpunkte	32	3	4	8

Mit drei Würfeln werden geringere Fehler für die Unbekannten erhalten als mit drei BW-Targets. Mit zunehmender Anzahl an BW-Targets nähern sich die Ergebnisse für die Transformationsparameter den Resultaten mit den Würfeln an.

8.2.2.2 Berechnungsbeispiel II: Abweichungen zur Sollgeometrie nach Transformation

Im Rahmen einer weiteren Testmessung kommen acht Würfel, acht Black- and White-Targets und fünf Kugeln mit einem Durchmesser von 152mm zum Einsatz.

Von den acht Würfeln ist ein Würfel (W8) nicht codiert. Er verfügt lediglich über weiße Ebenen und soll als Referenz für die spätere Transformation dienen. Aufgrund der weißen Flächen lassen sich die Eckpunkte des Würfels mit hoher relativer Genauigkeit bestimmen. Die Auswertung der Streckendifferenzen für den gescannten Würfel von den Standpunkten S_1 , S_2 und S_4 ergibt folgende mittlere L_m und maximale Längenabweichungen L_{max} .




















Tab. 8.2.5: Längenabweichungen des Würfels W8 (weißer Würfel)

Standpunkt	Würfel	Entfernung [m]	Längenabweichung [mm]	
			L_m	L_{max}
S_1	W8 [AD]	5.3	0.3	0.6
S_2	W8 [AD]	5.6	0.4	0.8
S_4	W8 [AD]	6.2	0.5	1.0















Die geringen Abweichungen rechtfertigen den Einsatz der Würfeleckpunkte als Referenzpunkte.

Zunächst werden jedoch die Transformationsparameter mit den unterschiedlichen Verfahren bestimmt. Die Tab. 8.2.6 - 8.2.8 zeigen hierzu die in den Punktwolken identifizierten Black- and White-Targets, Kugeln und Würfel der Standpunkte S_1 , S_2 und S_4 .



















Tab. 8.2.6: Identifizierte Black- and White-Targets pro Standpunkt (Berechnungsbeispiel II)

Target-ID	Identifizierte BW-Targets pro Standpunkt		
	S ₁	S ₂	S ₄
BW1			
BW2			
BW3			
BW4			
BW5			
BW6			
BW8			
BW9			
Anzahl	6	7	6

Tab. 8.2.7: Identifizierte Kugeln pro Standpunkt (Berechnungsbeispiel II)

Target-ID	Identifizierte Kugeln pro Standpunkt		
	S ₁	S ₂	S ₄
K1			
K2			
K3			
K4			
K5			
Anzahl	5	4	5

Tab. 8.2.8: Identifizierte Würfel pro Standpunkt (Berechnungsbeispiel II)

Würfel-ID	Identifizierte Würfel pro Standpunkt		
	S ₁	S ₂	S ₄
W1			
W2			
W3			
W4			
W5			
W6			
W7			
W8	weißer Würfel		
Anzahl	7	6	5

Für die Berechnung der Transformationsparameter zwischen Standpunkt S₁ und S₂ können demnach sechs Würfel, sechs BW-Targets und fünf Kugeln verwendet werden. Für eine bessere Vergleichbarkeit der

unterschiedlichen Verfahren werden jeweils vier Targets genutzt, die sich in einer annähernd identischen Aufnahmeconfiguration befinden, und mit diesen die Transformationsparameter bestimmt. Abb. 8.2.5 verdeutlicht die Anordnung der Targets von Standpunkt 1.

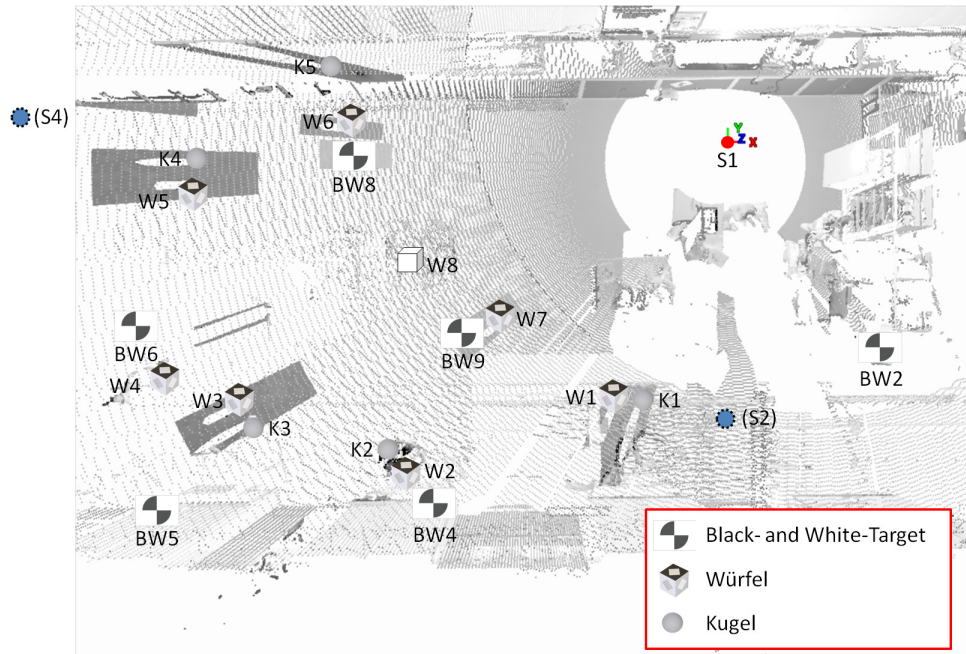


Abb. 8.2.5: Anordnung der erfassten Black- and-White-Targets, Kugeln und Würfel von Standpunkt S_1 (Berechnungsbeispiel II)

Die Ergebnisse für die Registrierung der Standpunkte S_1 und S_2 sind in Tab. 8.2.9 zusammengefasst.

Tab. 8.2.9: Gegenüberstellung der Ergebnisse der Transformation von S_2 nach S_1

Parameter	Vier Würfel (W1+5+6+7)	Vier BW-Targets (BW2+6+8+9)	Vier Kugeln (K1+2+3+5)
X_0 [m]	0.001 ± 0.000	0.000 ± 0.000	0.001 ± 0.001
Y_0 [m]	-4.274 ± 0.000	-4.274 ± 0.001	-4.277 ± 0.002
Z_0 [m]	-0.008 ± 0.000	-0.007 ± 0.001	-0.006 ± 0.002
m	1.000		
ω [°]	359.975 ± 0.008	359.988 ± 0.012	359.987 ± 0.024
ϕ [°]	0.004 ± 0.010	-0.011 ± 0.007	-0.017 ± 0.026
κ [°]	243.891 ± 0.003	243.889 ± 0.004	243.888 ± 0.014
m₀ [mm]	1.0	0.7	2.1
Passpunkte	32	4	4

Die Ergebnisse sind vergleichbar mit den Resultaten des Berechnungsbeispiels I. Die Würfel und BW-Targets liefern ähnliche Ergebnisse, während bei den Kugeln größere Fehler der Unbekannten und der Standardabweichung der Gewichtseinheit auftreten. Die Restklaffungen der Würfel betragen $<3\text{mm}$ (Abb. 8.2.6) und liegen damit etwas über den Restklaffungen der BW-Targets ($<1.3\text{mm}$).

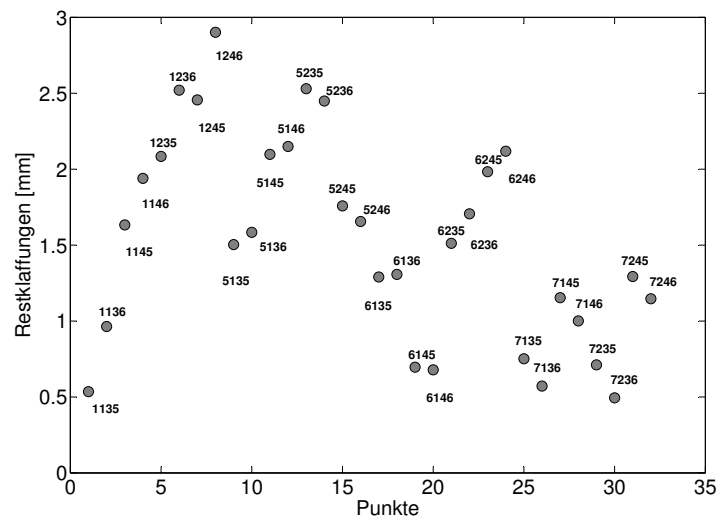


Abb. 8.2.6: Restklaffungen nach Transformation mit vier Würfeln (Berechnungsbeispiel II)

Der von Standpunkt S_2 gemessene, weiße Würfel wird im Anschluss mit Hilfe der ermittelten Transformationsparameter in Standpunkt S_1 transformiert, und es werden seine Abweichungen zur Solllage bestimmt. Die Solllage stellt dabei der von Standpunkt S_1 gemessene, weiße Würfel dar. Die sich dabei ergebenden Differenzen in den acht Würfeckpunkten sind in Tab. 8.2.10 wiedergegeben. EP bezeichnet den Würfeckpunkt, d_x , d_y und d_z die Abweichungen der einzelnen Koordinatenwerte. d_P beschreibt die Punktabweichungen, wobei gilt:

$$d_P = \sqrt{d_x^2 + d_y^2 + d_z^2} \quad (8.2.1)$$

Tab. 8.2.10: Koordinatendifferenzen des weißen Würfels (Transformation von S_2 nach S_1)

	Vier Würfel				Vier BW-Targets				Vier Kugeln			
EP	d_x [mm]	d_y [mm]	d_z [mm]	d_P [mm]	d_x [mm]	d_y [mm]	d_z [mm]	d_P [mm]	d_x [mm]	d_y [mm]	d_z [mm]	d_P [mm]
136	-0.3	-0.9	0.2	1.0	-0.4	1.4	0.1	1.5	-1.3	2.3	-0.3	2.7
135	-0.4	0.3	0.5	0.7	-0.5	0.8	0.5	1.0	-1.3	2.9	0.1	3.2
146	-0.8	0.9	0.8	1.4	-0.9	1.4	0.8	1.8	-1.8	2.3	0.4	3.0
236	0.1	0.9	0.2	1.0	0.0	1.5	0.2	1.5	-0.9	2.3	-0.2	2.5
246	-0.4	0.9	0.9	1.3	-0.5	1.5	0.9	1.8	-1.4	2.3	0.5	2.7
235	0.1	0.3	0.6	0.7	0.0	0.9	0.6	1.0	-0.9	2.9	0.2	3.0
145	-0.8	0.2	1.1	1.5	-1.0	0.8	1.1	1.7	-1.9	3.0	0.8	3.6
245	-0.4	0.3	1.2	1.3	-0.6	0.8	1.2	1.6	-1.5	2.9	0.8	3.4

Hierbei wird deutlich, dass die Punktabweichungen aller drei Verfahren im Bereich einiger Millimeter liegen und die Abweichungen der Eckpunkte, die mit den Transformationsparametern der Kugelregistrierung bestimmt wurden, am größten sind. Die Berechnung mit den Würfeln zeigt etwas bessere Ergebnisse als die Registrierung mit den Black- und White-Targets.

Wie in Tab. 8.2.2 gezeigt, besteht ein Vorteil der Würfel darin, dass mit nur einem Target die Bestimmung der Transformationsparameter möglich ist. Um die Güte dieser Parameter zu bestimmen, erfolgt die

Berechnung der Abweichungen von der Solllage mit den Transformationsparametern, die zuvor mit unterschiedlicher Würfelanzahl bestimmt wurden. Die Abb. 8.2.7 (a)-(c) und Tab. 8.2.11 stellen die Ergebnisse unter Verwendung von 1-3 Würfeln dar.

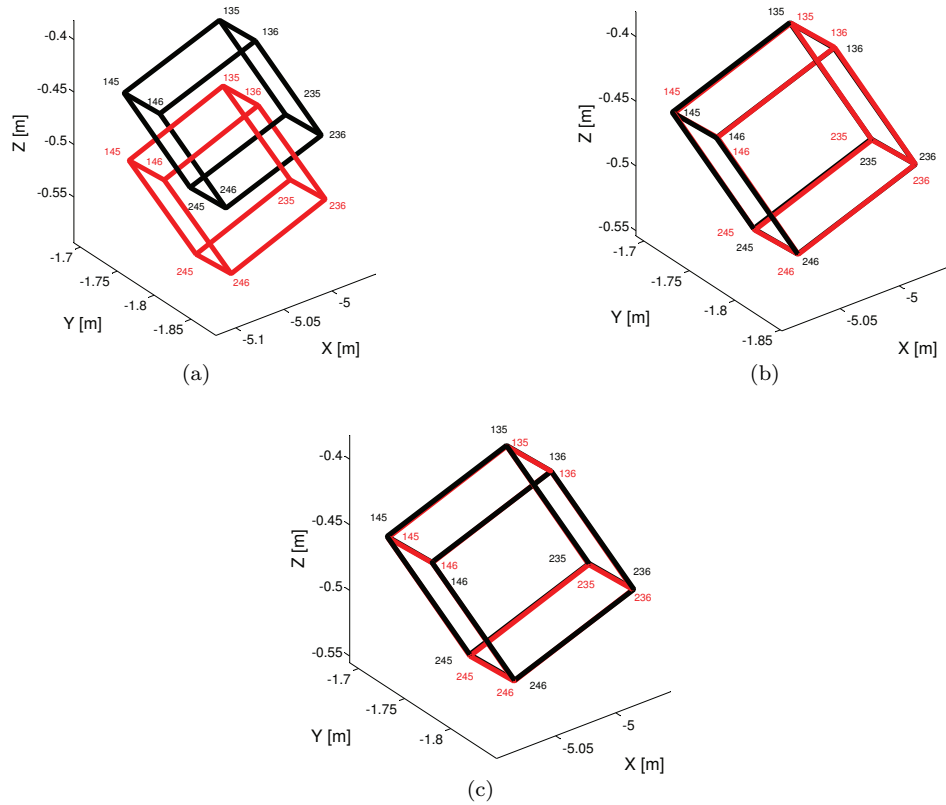


Abb. 8.2.7: Abweichungen von der Solllage nach Transformation mit (a) einem, (b) zwei und (c) drei Würfeln

Tab. 8.2.11: Koordinatendifferenzen des weißen Würfels bei Berechnung der Transformationsparameter mit unterschiedlicher Würfelanzahl (Transformation von S_2 nach S_1)

EP	Ein Würfel (W1)				Zwei Würfel (W1+5)				Drei Würfel (W1+5+6)			
	d_x [mm]	d_y [mm]	d_z [mm]	d_P [mm]	d_x [mm]	d_y [mm]	d_z [mm]	d_P [mm]	d_x [mm]	d_y [mm]	d_z [mm]	d_P [mm]
136	22.1	32.8	38.7	55.3	0.5	1.3	-1.4	1.9	-0.3	-0.8	0.4	0.9
135	22.2	33.8	39.3	56.4	0.6	2.1	-0.8	2.4	-0.4	-0.2	0.7	0.8
146	21.5	33.9	40.1	56.7	-0.1	1.2	-0.7	1.4	-0.8	-0.7	1.0	1.5
236	21.3	33.0	38.3	54.8	0.8	1.1	-1.0	1.7	0.1	-0.8	0.5	1.0
246	20.7	34.1	39.7	56.2	0.2	0.9	-0.3	1.0	-0.4	-0.8	1.1	1.4
235	21.3	34.0	38.9	55.9	0.9	1.9	-0.4	2.2	0.1	-0.2	0.8	0.8
145	21.5	34.9	40.7	57.8	0.0	2.0	-0.1	2.0	-0.8	-0.1	1.4	1.6
245	20.7	35.1	40.3	57.3	0.3	1.8	0.3	1.8	-0.4	-0.2	1.5	1.5

Bei der Transformation mit nur einem Würfel betragen die Abweichungen weniger als 100mm. Wird ein

zweiter Würfel verwendet, bewegen sich die Werte bereits im Bereich von 1-3mm.

Für die Transformation der sich nahezu gegenüberliegenden Standpunkte S_4 und S_1 mit dem Würfel W5 ergeben sich ähnliche Koordinatendifferenzen (Tab. 8.2.12).

Tab. 8.2.12: Koordinatendifferenzen des weißen Würfels bei Transformation mit einem Würfel

EP	Ein Würfel			
	d_x [mm]	d_y [mm]	d_z [mm]	d_P [mm]
136	-11.2	12.8	62.0	64.2
135	-12.2	14.1	61.7	64.5
146	-11.0	12.2	61.3	63.5
236	-10.9	12.5	62.5	64.6
246	-10.8	11.9	61.9	63.9
235	-11.9	13.9	62.2	64.9
145	-12.0	13.5	61.1	63.7
245	-11.7	13.2	61.6	64.1

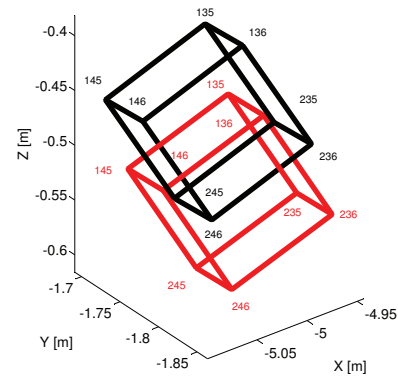


Abb. 8.2.8: Differenzen zur Sollage bei Transformation mit einem Würfel (Transformation von S_4 nach S_1)

Die Punktabweichungen liegen auch in diesem Fall deutlich unter 100mm. Dies bestätigt, dass bereits ein Würfel eine gute Näherungslösung für die Transformationsparameter liefert.

8.2.3 Weitere Analysen

8.2.3.1 Transformationsparameter mit vier Würfeckpunkten pro Würfel

Mit dieser Untersuchung wird geprüft, ob ein Einfluss der mit einer höheren Bestimmungsunsicherheit behafteten, vom jeweiligen Standpunkt aus verdeckten Eckpunkte E_5 - E_8 auf die Transformationsparameter besteht. Hierzu erfolgt die Berechnung der Transformationsparameter zum einen nur mit den vorderen vier, zum anderen mit allen acht Eckpunkten der erfassten Würfel. Alle Standpunkte müssen dabei die gleiche Sicht auf die Würfel besitzen. Abb. 8.2.9 zeigt die verwendete Messanordnung für die Transformation von S_1 und S_2 , wobei die Würfel W1-3 und W6-8 verwendet werden.

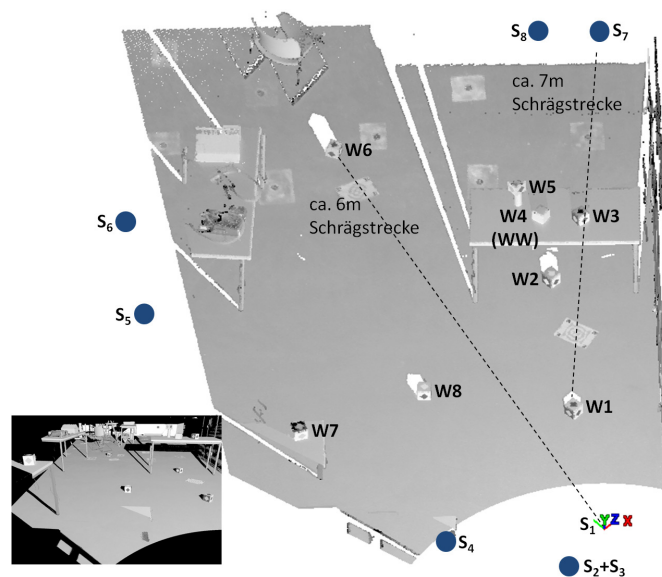
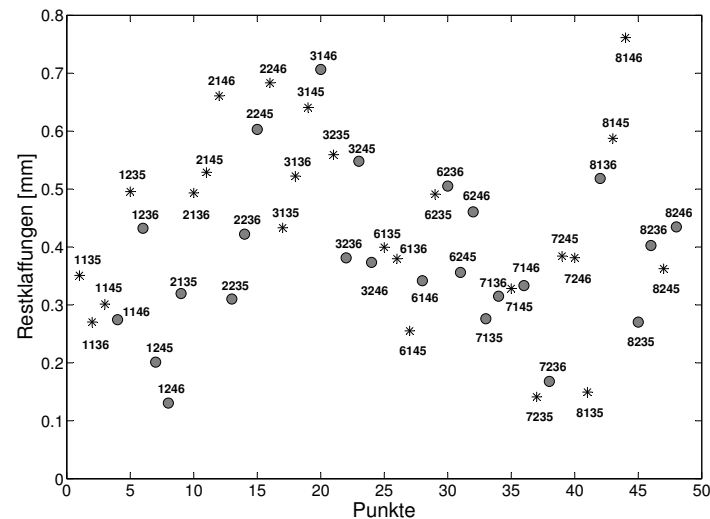


Abb. 8.2.9: Messanordnung zur Prüfung des Einflusses der hinteren Eckpunkte auf die Transformationsparameter

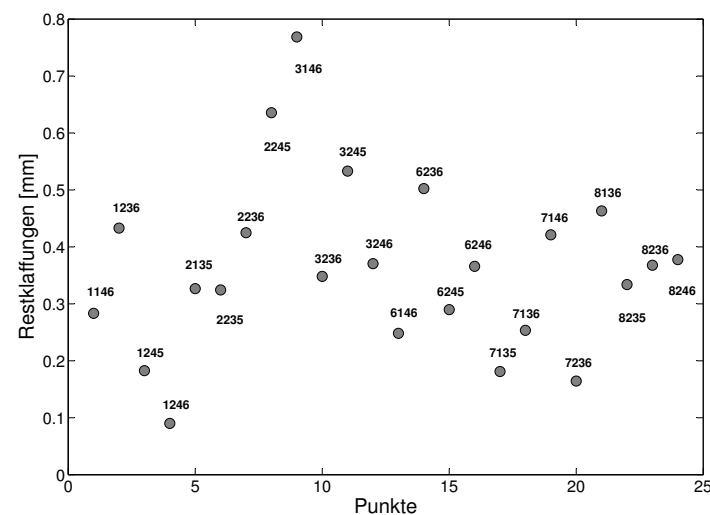
Tab. 8.2.13: Gegenüberstellung der Ergebnisse der Helmert-Transformation mit acht bzw. vier Eckpunkten pro Würfel

	W1+2+3+6+7+8		W3+6+7	
Eckpunkte pro Würfel	8	4	8	4
X_0 [m]	-0.561 ± 0.000	-0.561 ± 0.000	-0.562 ± 0.000	-0.561 ± 0.000
Y_0 [m]	-0.736 ± 0.000	-0.736 ± 0.000	-0.736 ± 0.000	-0.736 ± 0.000
Z_0 [m]	0.001 ± 0.000	0.002 ± 0.000	0.001 ± 0.000	0.001 ± 0.000
m	1.000			
ω [°]	359.983 ± 0.002	359.981 ± 0.003	359.985 ± 0.003	359.984 ± 0.003
ϕ [°]	0.041 ± 0.002	0.044 ± 0.003	0.040 ± 0.002	0.045 ± 0.003
κ [°]	260.674 ± 0.001	260.673 ± 0.001	260.672 ± 0.001	260.672 ± 0.002
m_0 [mm]	0.3	0.2	0.2	0.8
Passpunkte	48	24	24	12

Die Tab. 8.2.13 zeigt die Gegenüberstellung der Ergebnisse der Helmert-Transformation mit acht und vier Eckpunkten unter Verwendung von sechs bzw. drei Würfeln. Insgesamt treten bei der Nutzung von acht bzw. vier Eckpunkten pro Würfel nur sehr geringe Restklaffungen auf, die unterhalb von einem Millimeter liegen. Die Abb. 8.2.10 und Abb. 8.2.11 veranschaulichen dies, wobei die hinteren Eckpunkte mit einem Stern (*) symbolisiert sind.



(a)

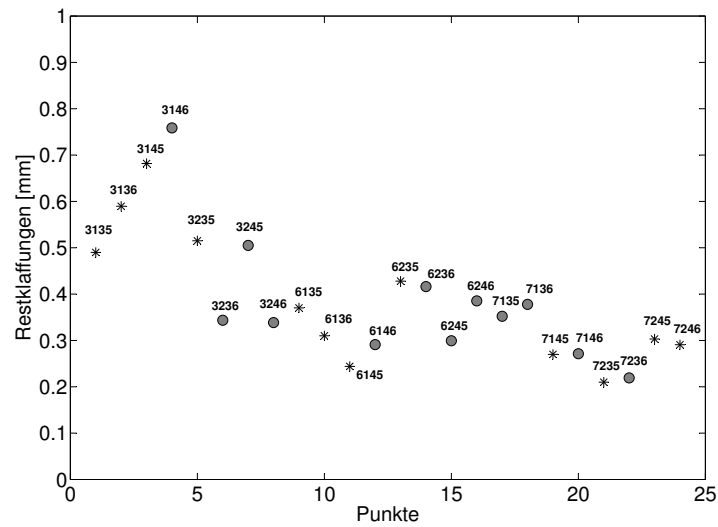


(b)

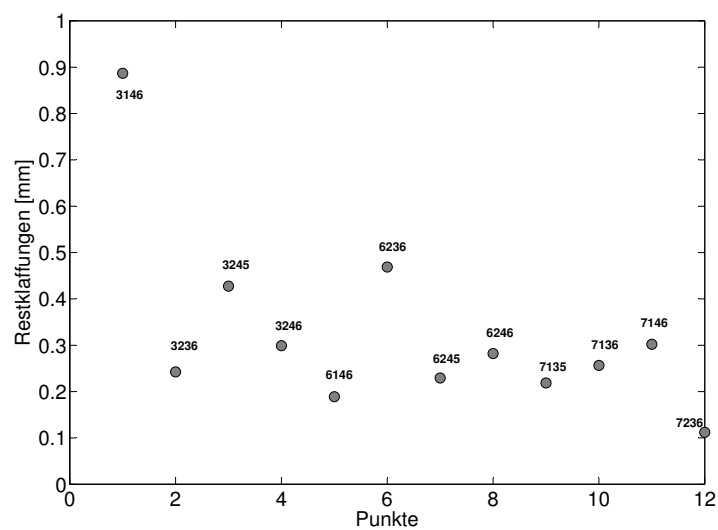
Abb. 8.2.10: Restklaffungen der Eckpunkte nach Transformation mit sechs Würfeln – (a) mit acht Eckpunkten – (b) mit vier Eckpunkten pro Würfel

Die Ergebnisse bei der Berechnung mit nur vier Eckpunkten weisen keine signifikanten Unterschiede zur

Bestimmung mit acht Eckpunkten pro Würfel auf. Erneut ist erkennbar, dass schon mit nur drei Würfeln gute Ergebnisse erzielt werden (Abb. 8.2.11). Die Restklaffungen sind in allen Fällen $< 1\text{mm}$.



(a)



(b)

Abb. 8.2.11: Restklaffungen der Eckpunkte nach Transformation mit drei Würfeln – (a) mit acht Eckpunkten – (b) mit vier Eckpunkten pro Würfel

8.2.3.2 Transformationsparameter gegenüberliegender Standpunkte

Die Ergebnisse der Transformationsparameter gegenüberliegender Standpunkte, berechnet mit drei Würfeln, zeigt Tab. 8.2.14. Im Vergleich zur Transformation der Standpunkte mit ähnlicher Sicht auf die

Würfel (Abb. 8.2.11) zeigen sich hierbei größere Restklaffungen (Abb. 8.2.12).

Tab. 8.2.14: *Ergebnisse der Transformation gegenüberliegender Standpunkte*

Parameter	W1+3+6
X_0 [m]	-6.205 ± 0.000
Y_0 [m]	3.622 ± 0.001
Z_0 [m]	-0.369 ± 0.001
m	1.000
ω [°]	359.981 ± 0.017
ϕ [°]	-0.010 ± 0.010
κ [°]	41.778 ± 0.008
m_0 [mm]	1.1
Passpunkte	24

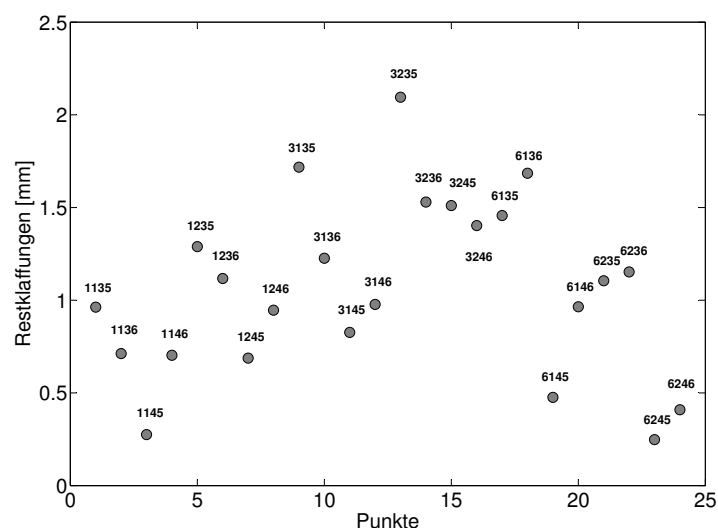


Abb. 8.2.12: *Restklaffungen gegenüberliegender Standpunkte nach Transformation mit drei Würfeln*

8.2.3.3 Bodenfläche als Ersatzebene

Bei der Berechnung der Deckelfläche eines sich auf dem Boden befindlichen Würfels besteht oftmals das Problem, dass zu wenige Punkte erfasst werden können. Mit größer werdendem Auftreffwinkel auf die Deckelfläche verringert sich die theoretisch erfassbare Punktzahl aufgrund der Rasterung. Deshalb kann es zweckmäßig sein, Bodenflächen als Ersatzebenen für die Deckelfläche heranzuziehen. Tab. 8.2.15 zeigt beispielhaft die Berechnung der Würfelckpunkte mit Deckelfläche und Bodenfläche sowie die Differenzen der beiden Ergebnisse für die Eckpunktkoordinaten.

Die Ergebnisse belegen, dass sich die Bodenfläche als Ersatzebene eignet. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass diese keine Möglichkeit der Codierung bietet. Die Bestimmung der Würfelcodierung erschwert sich damit, da die Codierungen der beiden anderen Ebenen eindeutig erkannt werden müssen.

Tab. 8.2.15: *Vergleich der Eckpunktkoordinaten bei unterschiedlicher Berechnung*

EP	Bodenfläche			Deckelfläche			Boden-Deckel [mm]		
	x [m]	y [m]	z [m]	x [m]	y [m]	z [m]	x [mm]	y [mm]	z [mm]
246	2.2825	1.5427	-0.9456	2.2824	1.5425	-0.9450	0.1	0.2	-0.6
245	2.2812	1.5406	-0.8456	2.2812	1.5408	-0.8450	-0.1	-0.1	-0.6
236	2.3820	1.5524	-0.9452	2.3819	1.5522	-0.9445	0.1	0.2	-0.7
146	2.2731	1.6423	-0.9449	2.2729	1.6421	-0.9441	0.1	0.2	-0.8
136	2.3726	1.6519	-0.9445	2.3725	1.6517	-0.9436	0.1	0.2	-0.9
145	2.2718	1.6402	-0.8449	2.2718	1.6403	-0.8441	-0.0	-0.1	-0.8
235	2.3807	1.5503	-0.8452	2.3808	1.5504	-0.8445	-0.1	-0.1	-0.7
135	2.3713	1.6498	-0.8445	2.3713	1.6499	-0.8436	-0.0	-0.1	-0.9

9 Auswertung der Bilddaten und ihre Verknüpfung mit den Scandaten

9.1 Auswertung der Bilddaten

In diesem Kapitel wird eine schematische Vorgehensweise zur Erkennung der Eckpunkte in den Bildern vorgestellt. Diese soll als exemplarisches Beispiel verstanden werden und beinhaltet die wichtigsten Arbeitsabläufe. Wie einige dieser Schritte im Einzelnen umgesetzt werden können, zeigen exemplarische Beispiele unter Verwendung der Image Processing Toolbox in Matlab ([Mat11b]).

Zur Erkennung der Eckpunkte in den Bildern und der Bildzuordnung lassen sich allgemein die in den Kap. 3.2.3.2 - 3.2.5 genannten Verfahren verwenden. Ein Beispiel hierfür wird in Kap. 9.3 bei der Verknüpfung mit den Scandaten erläutert.

9.2 Bestimmung der Würfeckpunkte im Bild

In einem ersten Schritt muss der Würfel im Bild gefunden und seine einzelnen Elemente identifiziert werden. Hierzu wird das Bild unter Verwendung der in die Kap. 3.2.3 vorgestellten Verfahren segmentiert. Zur Lokalisation der Kanten des Würfels eignen sich Kantenfilter. [Mat11b] liefert beispielsweise bereits vordefinierte Operatoren (Sobel-, Canny- oder der Prewitt-Operator) zur Kantendetektion (Abb. 3.2.1 (b)). Zur Lokalisation der Kanten im Bild wird im Anschluss eine Hough-Transformation durchgeführt.

Die Abb. 9.2.1 (a)-(c) zeigen exemplarisch die Identifikation von Kanten im Bild mittels Kantenfilterung und anschließender Hough-Transformation. Im nächsten Schritt muss geprüft werden, welche identifizierten Kanten zum Würfel gehören.

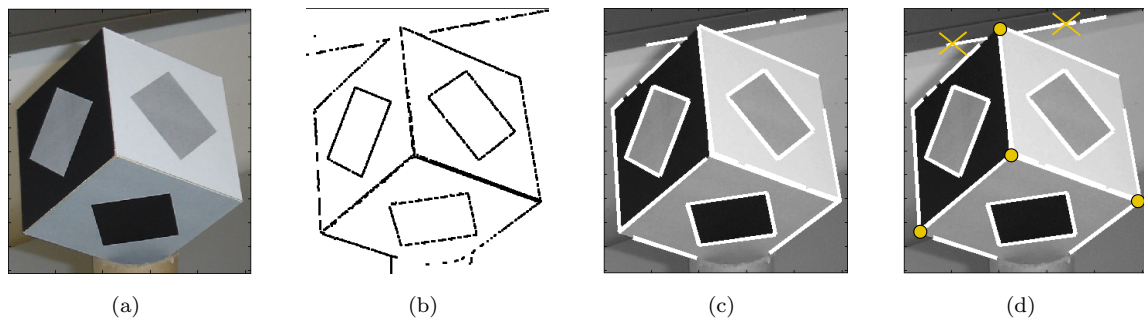


Abb. 9.2.1: Kantenfilterung und Hough-Transformation – (a) Bildausschnitt – (b) Kantenbild – (c) Identifizierte Kanten nach Hough-Transformation – (d) schematische Darstellung der Elimination „falscher“ Kanten und der ermittelten Eckpunkte nach Geradenschnitt

In Abb. 9.2.1 (d) ist eine Kante zu sehen, die nicht zum Würfel gehört. Sie ist durch zwei Kreuze markiert und muss als „sonstige“ Kante klassifiziert werden.

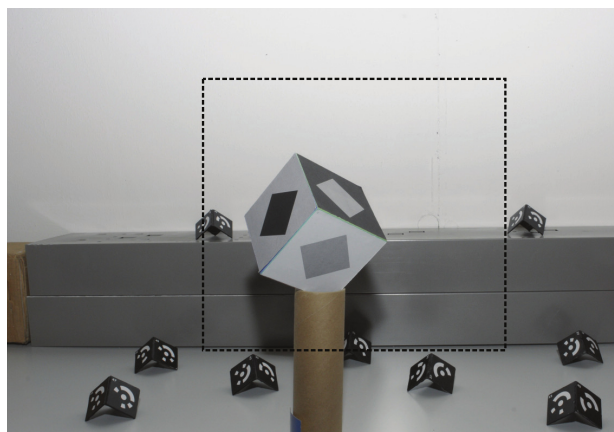
Für eine Klassifikation von „sonstigen“ Kanten und Würfelkanten werden die Kanten in [Boo01] einer Homogenitätsbetrachtung unterzogen. Durch Einbeziehung der direkten Nachbarschaft der Kante wird geprüft, ob (Farb-)Flächen vorliegen, die mit den potentiellen Farbwerten einer Würfel Fläche übereinstimmen und homogen sind. Diese Vorgehensweise kann für die vorliegenden Würfel mit den Grauwertteilflächen der Ebenen ebenfalls angewandt werden. Des Weiteren können Zusatzbedingungen, wie beispielsweise Parallelitätsbedingungen gegenüberliegender Kanten genutzt werden, um diese als Würfelkanten zu

identifizieren. Sind die Kanten des Würfels identifiziert, lassen sich durch Geradenschnitt die gesuchten Bildkoordinaten der Eckpunkte des Würfels im Bild bestimmen, schematisch dargestellt in Abb. 9.2.1 (d).

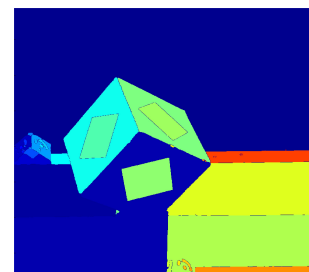
In Abb. 9.2.1 wird ein zuvor manuell selektierter Bildausschnitt des Würfels verwendet. Ohne diese vorgeschaltete manuelle Selektion des Bildausschnittes sollte der Suchbereich für die Würfelkanten zunächst eingeschränkt werden.

Anstelle der Suche nach Kanten im Bild lassen sich homogene Segmentierungsverfahren, wie beispielsweise das Watershed-Verfahren (vgl. Kap. 3.2.3) zur Abgrenzung der Ebenen und/oder ihrer Teilflächen einsetzen (Abb. 9.2.2 (b) und (c)). Diese spielen auch für die Ermittlung der Ausrichtung des Würfels eine Rolle: je nach Kamerastandpunkt werden – ebenso wie beim Scanning – unterschiedliche Ebenen mit Grund- und Symbolfläche abgebildet (Abb. 9.2.3 (a)).

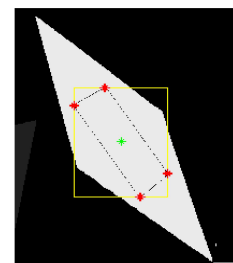
Zur Ermittlung der sichtbaren Ebenen in den Bildern kann eine Histogrammanalyse der Ebenen durchgeführt werden. Diese liefert die Verteilung der Grauwerte der einzelnen Teilflächen (Abb. 9.2.3 (b)-(d)). Unter Berücksichtigung eventuell vorhandener Belichtungsunterschiede und des in Kap. 6.1 entworfenen topologischen Modells kann im Anschluss eine Zuordnung der Ebenen- und Eckpunktcodes erfolgen.



(a)



(b)



(c)

Abb. 9.2.2: Segmentierung der Würfelteilflächen mittels Watershed-Algorithmus –
 (a) Manuelles Ausschneiden des Würfels aus dem Bild – (b) Segmentierung in Teilflächen –
 (c) Bestimmung der Bildkoordinaten der Symbolfläche

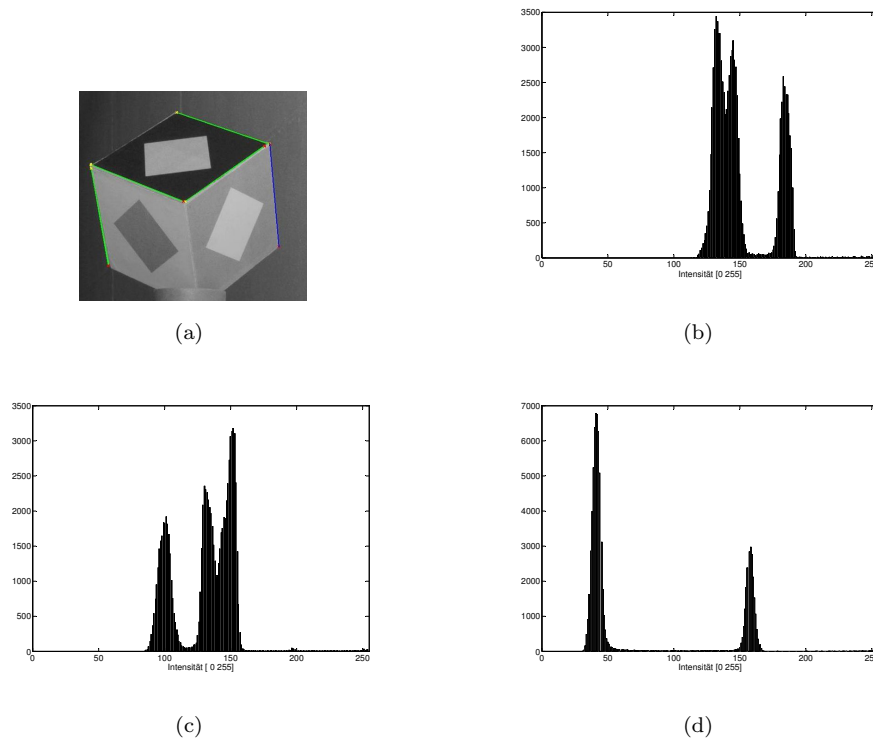


Abb. 9.2.3: Histogramme der Grauwerte der Ebenen – (a) auszuwertender Würfel – (b) rechte Ebene: Gw (grau-weiß) – (c) linke Ebene: Wg (weiß-grau) – (d) obige Ebene: Sg (schwarz-grau)

Nach erfolgreicher Identifikation, Extraktion und Codierung der Eckpunkte muss die Zuordnung homologer Bildpunkte erfolgen. Hierzu eignen sich die in Kap. 3.2.4 und Kap. 3.2.5 beschriebenen Verfahren. Zur Berechnung des 3D-Bildmodells kann eine Bündelblockausgleichung (Kap. 3.1.2) verwendet oder auf SfM-Algorithmen ([LYWZ06]) zurückgegriffen werden.

Die prinzipielle Funktionstüchtigkeit eines Verfahrens zur automatisierten Detektion von kubischen Verknüpfungsobjekten in digitalen Messbildern wird in [Boo01] beschrieben. Im Gegensatz zu dem entwickelten Prototypen verfügen die dort verwendeten Ebenen der Würfel allerdings über eine farbliche Codierung, die eine Abgrenzung zum Hintergrund und die Identifikation im Bild erleichtert.

9.3 Gemeinsame Verwendung von Bild- und Scandaten

Die Eckpunkte der entwickelten Passkörper liefern gut identifizierbare (identische) Punkte in den Bild- und Scandaten. Diese können sowohl zur Korrespondenzherstellung zwischen den homogenen Datentypen 2D-Bild-zu-2D-Bild und 3D-Scan-zu-3D-Scan, als auch zur Verknüpfung von Bild- und Scandaten (vgl. Kap. 4.2 Abb. 4.2.1) verwendet werden. Abb. 9.3.1 zeigt dies schematisch.

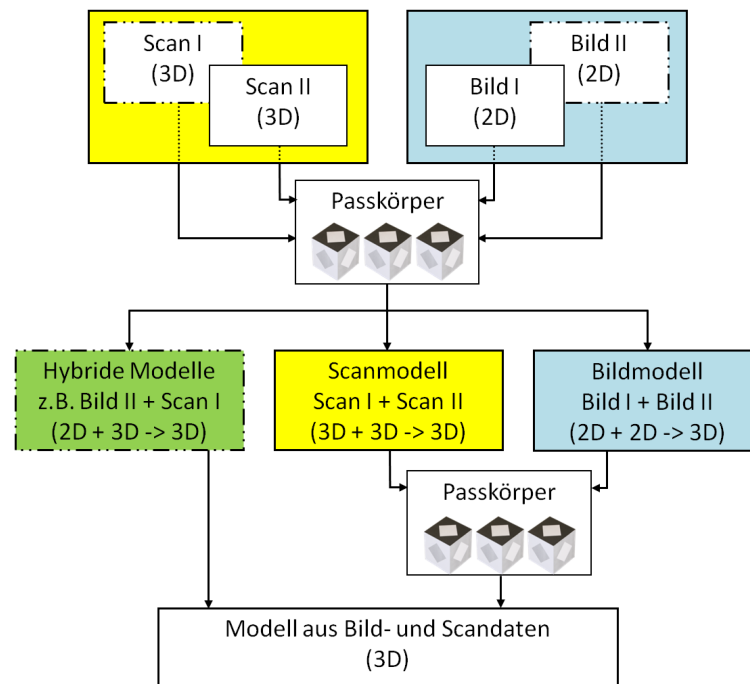


Abb. 9.3.1: Gemeinsame Verwendungsmöglichkeiten von Bild- und Scandaten

Das Verfahren zur Registrierung der Scandaten (3D-3D) mit Hilfe der Eckpunkte der Passwürfel wurde in Kap. 7 erläutert. Zur Verknüpfung der Bilddaten (2D-2D) müssen die Eckpunkte des Würfels identifiziert und homologe Eckpunkte einander zugeordnet werden. Hierzu bestehen unterschiedliche Möglichkeiten. In Kap. 9.2 ist exemplarisch ein halbautomatisiertes, in Kap. 3.2.5 sind mögliche automatisierte Verfahren mit Hilfe von Interest-Operatoren vorgestellt worden. Für die Verknüpfung der Bilder zu einem 3D-Bildmodell können SfM-Algorithmen eingesetzt werden.

Nach der Berechnung des 3D-Bildmodells kann dieses wiederum unter Nutzung der identifizierten Würfeckpunkte mit dem 3D-Scanmodell verknüpft werden. Zur Bestimmung der Transformationsparameter zwischen dem 3D-Scanmodell und 3D-Bildmodell schlägt [Sch10] eine integrierte Bündelblockausgleichung von Bildern und Punktwolken vor. Hierbei kann das Objektkoordinatensystem durch das lokale Scannerkoordinatensystem realisiert werden. [LA09] stellt eine Bündelblockausgleichung „sparse bundle adjustment“ vor, welche die unterschiedlichen Punktzahlen beider Modelle berücksichtigt.

Sind die Transformationsparameter zwischen beiden Modellen bekannt, lassen sich Punkte des einen Modells in das andere transformieren und ein vollständigeres Gesamtmodell erhalten. Jeder Punkt des 3D-Bildmodells und jeder Punkt des 3D-Scanmodells lässt sich in ein 2D-Bild projizieren und eine zugehörige Bildkoordinate bestimmen.

In mehreren Bildern gemessene oder automatisch identifizierte Punkte oder Strukturen können ins 3D-Bildmodell und anschließend in das 3D-Scanmodell transformiert werden. Zu ihrer Identifikation eignen

sich die in Kap. 3.2.3.2 und Kap. 3.2.5 beschriebenen Interest-Operatoren wie beispielsweise SIFT.

Abb. 9.3.2 gibt einen Überblick des Zusammenspiels von Bild- und Scandaten und zeigt mögliche Verfahren zur Bilddatenverknüpfung aus Kap. 3.2.5 und Kap. 4.5.1. Die in dieser Arbeit realisierte Lösung, die Registrierung der Scandaten, ist dabei grau hinterlegt.

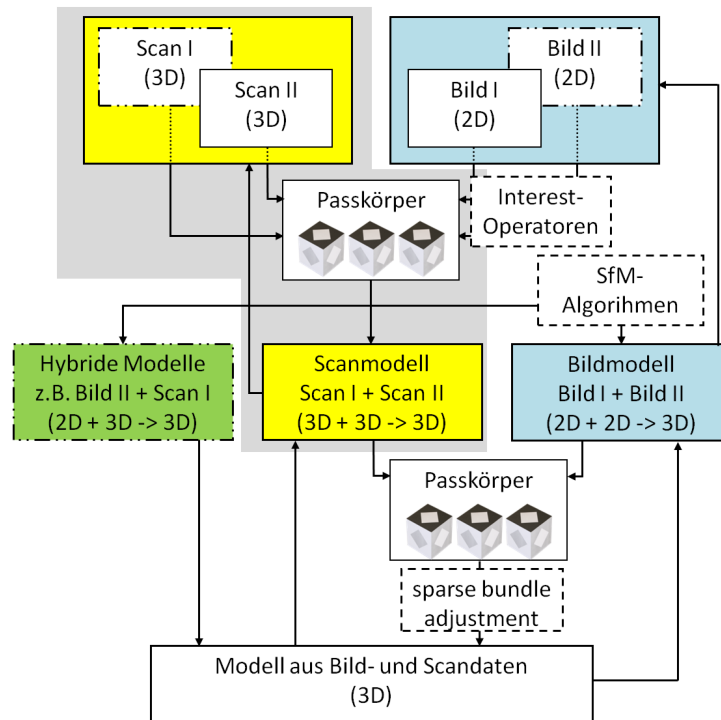


Abb. 9.3.2: Gemeinsame Verwendungsmöglichkeiten von Bild- und Scandaten II

Ein beispielhaftes Verfahren zur Erzeugung hybrider Modelle (vgl. Abb. 4.3.1) ist in [SLC⁺08] zu finden. Hierbei werden 2D-Linien aus den Bildern und 3D-Linien aus den Scandaten extrahiert und in Clustern zusammengefasst. Auf Basis dieser Linienobjekte wird die Orientierung zwischen Kamera- und Scannerkoordinatensystem hergestellt. Weitere Details sind [SA02], [LS05] und [SA01] zu entnehmen.

Die Verknüpfung von 3D-Bildmodell und 3D-Scanmodell bietet den Vorteil ein vollständigeres Modell zu erhalten und die Geometrieinformationen aus beiden Modellen generieren zu können. Für feine Strukturen, die in der Punktwolke aufgrund einer geringen Abtastauflösung nicht identifizierbar sind oder Kanten, die mit einem hohen Messrauschen behaftet sind, kann die Geometrieinformation aus dem Bildmodell verwendet werden. Für flächenhafte Elemente mit wenig Textur, die in den Bildern nur unzureichend bestimmt werden können, lassen sich die Geometrieinformationen aus dem Scanmodell nutzen.

10 Zusammenfassung und Ausblick

10.1 Einordnung des Verfahrens

Mit dem entwickelten Verfahren gelingt eine weitgehend automatisierte Registrierung von Scandaten. Es bietet folgende Vorteile gegenüber bestehenden Methoden:

- Besseres Antastverhalten der Würfel als bei Kugeln aufgrund der Nutzung der datentypischen Eigenschaften des Laserscannings.
- Es ist keine Zwangszentrierung der Passkörper notwendig, wie beispielsweise bei rotierbaren Zielmarken.
- Die Scannerstandpunkte benötigen keinen Überlappungsbereich auf dem Würfel, d.h. es muss kein identischer Eckpunkt von unterschiedlichen Standpunkten „gesehen“ werden, wie dies bei Black- and White-Targets der Fall ist. Dies ermöglicht die Verknüpfung von Standpunkten, die eine komplett unterschiedliche Sicht auf den Würfel haben.
- Durch den Einsatz von speziell entwickelten Passkörpern besteht eine Unabhängigkeit von den tatsächlich vorhandenen Objekten, die unter Umständen keine Identifikation identischer Elemente erlauben.
- Die Qualität eines einzelnen Targets lässt sich direkt beurteilen, indem die Würfelgeometrie, respektive die Abweichungen in den Flächen- und Raumdiagonalen, überprüft, und diese Information zur Gewichtung bei der Transformation verwendet werden kann.
- Für die Registrierung werden insgesamt weniger Targets benötigt, da ein Würfel acht Passpunkte bereitstellt. Werden drei Würfel räumlich verteilt, sind bereits sehr gute Ergebnisse erreichbar. Mit nur einem Würfel kann bereits eine gute Näherungslösung für die Transformationsparameter ermittelt werden, sodass sich das Verfahren sehr gut zur Beschaffung von Näherungswerten – beispielsweise für einen nachfolgenden ICP-Algorithmus – eignet, wenn stark strukturierte Oberflächen verknüpft werden sollen.

Das Verfahren liefert ebenso gute Resultate bezüglich der Genauigkeit bei der Registrierung von Scandaten wie bestehende Methoden. Es schafft zugleich gute Voraussetzungen zur Verknüpfung der Scan- mit den Bilddaten, da die charakteristischen Merkmale beider Datentypen, nämlich geometrische und visuelle Eigenschaften, Berücksichtigung finden. Hierdurch wird die kombinierte Nutzung vereinfacht. Einhergehend ist eine Erhöhung der Flexibilität bei der Datenerfassung, da Scanner- und Kamerastandpunkt nicht identisch sein müssen.

10.2 Aspekte der Praktikabilität

Das Verfahren ist mit den konzipierten Passkörpern bis zu einem Entfernungsbereich von 10m sehr gut einsetzbar. Für Distanzen von 10-15m muss je nach Ausrichtung des Würfels zum Scanner mit höheren Unsicherheiten bei der Eckpunktbestimmung gerechnet werden, die durch eine entsprechende Gewichtung bei der Transformation berücksichtigt werden sollten.

Für größere Distanzen ist die Bestimmung der Würfel nur in Einzelfällen möglich, wobei mit Abweichungen von einigen Millimetern zu rechnen ist.

Für die Anwendung bei Entfernungen jenseits von 15m ist eine Vergrößerung der Würfel notwendig, um die Würfel identifizieren zu können. Eine Kantenlänge von 200mm sollte aus Gründen der Praktikabilität jedoch nicht überschritten werden, wodurch sich der Einsatzbereich auf ca. 25m Entfernung erweitern ließe. Die Ausrichtung des Würfels muss dabei ebenfalls beachtet werden. Ein Problem für die Erfassung der Würfel bei großen Entfernungen ergibt sich vor allem, wenn die Deckelfläche des Würfels nahezu parallel zur X-Y-Ebene des Scanners ausgerichtet ist und aufgrund dieser ungünstigen Perspektive nur unzureichend, d.h. mit nur wenigen Punkten aufgenommen werden kann. In solchen Fällen wird die Verwendung eines Adapters oder die Nutzung einer Ersatzebene, z.B. einer Bodenfläche empfohlen.

Bei Nutzung einer Ersatzebene verschlechtert sich allerdings die Wahrscheinlichkeit für eine erfolgreiche Ermittlung der Codierung, da bestenfalls die Codierung der zwei eigentlich zum Würfel gehörigen Ebenen erfolgen kann. Dementsprechend muss ihre Codierung eindeutig ermittelbar sein, d.h. ihr Auftreffwinkel darf bei der derzeitigen Modellierung 75° nicht überschreiten. Abhilfe könnte die Verwendung eines weiteren Codierungssymbols schaffen, das eine Ermittlung der Würfelausrichtung mit nur einer identifizierten Ebene ermöglichen soll. Hierbei müsste allerdings sichergestellt werden, dass die unterschiedlichen Symbolflächen aufgelöst werden können.

10.3 Verbesserungen bei der Umsetzung des Lösungsansatzes

Da der Würfel zu Beginn des Verfahrens manuell aus der Punktwolke extrahiert werden muss, besteht eine Verbesserung des Lösungsansatzes in der Implementation eines Suchalgorithmus, der die Punktwolke nach dem Würfel absucht. Eine voll automatisierte Suche wäre allerdings mit einer hohen Rechenintensität behaftet. Anwenderfreundlich erscheint eine teilweise Selektion des Passkörperbereiches ähnlich dem Vorgehen bei Black- und White-Targets. Hierzu müssten Bedingungen bei der Ebenensuche eingeführt werden, die eine robuste Identifikation der Würfebenen sicherstellt. Beispielsweise sollte die orthogonale Ausrichtung der Ebenen zueinander Berücksichtigung finden.

Des Weiteren könnten einige Verbesserungen in der Implementierung erfolgen:

- Gewichtung der Würfeckpunkte für Transformation und Bündelblockausgleichung.
- Weitere Tests zur Auswertung mittels Bodenfläche, um eine Lösungsmöglichkeit für größere Abstände zu realisieren.
- Automatisierte Zuordnung der Targets zueinander durch Nutzung aller sichtbaren Würfel eines Standpunktes.
- Einbeziehung von Zusatzinformationen: Bei gescheitertem Codierungsversuch, kann der Würfelschwerpunkt als Passpunkt verwendet werden.
- Intensitätsanalysen bei Außenmessungen.

Im Rahmen dieser Arbeit konnte lediglich die schematische Vorgehensweise zur Ermittlung der Würfeckpunkte in den Bilddaten und ihre Verknüpfung aufgezeigt werden. Eine komplette algorithmische Umsetzung konnte bisher noch nicht realisiert werden, sodass dies im Rahmen von Weiterentwicklungen und unter Berücksichtigung des für die Scandaten entwickelten topologischen Modells erfolgen sollte.

Der entwickelte Passkörper stellt dabei einen möglichen Prototyp dar. Andere Konzeptionen sind denkbar. Beispielsweise könnten weitere geometrische Unterscheidungsmerkmale, wie verschiedene Kantenlängen,

als Zusatzinformationen verwendet werden. Anstelle eines Passwürfels entstünde dann ein Passquader, der bezüglich der Scandatenverarbeitung den Vorteil bietet, die Ebenen geometrisch unterscheiden und damit die Ausrichtung im Raum einfacher ermitteln zu können. Das entwickelte topologische Modell ließe sich mit der Zusatzinformation entsprechend erweitern.

Im Hinblick auf die gemeinsame Verwendung mit Bilddaten müssen die einzelnen Seiten jedoch visuell unterscheidbar und Kanten identifizierbar sein, damit die Ausrichtung des Passkörpers ermittelt werden kann.

Abbildungsverzeichnis

2.2.1	Instrumentensystem eines Laserscanners definiert durch die primäre und sekundäre Drehachse	13
2.2.2	Arten der Reflexion	14
2.2.3	Einfluss der Objektausrichtung auf die Punktzahl	15
2.2.4	Ausprägung der Reflexionsfläche im Zusammenhang mit der Strahldivergenz	16
2.3.1	Einfluss der Oberflächenform auf die Signalform	17
2.3.2	Gemischtes Vorder- und Hintergrundsignal	18
2.3.3	Auftreffwinkel	19
2.3.4	Auftreffwinkel und Divergenz	20
2.4.1	Intensitätswertbasierte Darstellung der Punktwolke des Messbrettes	21
2.4.2	Standardabweichungen s_0 der Teilflächen des Messbrettes	21
2.5.1	Scans der Porta Nigra in Trier	22
2.5.2	Gescannte Kugel in unterschiedlichen Ansichten	23
2.5.3	Darstellung unterschiedlicher Zielmarken	24
2.5.4	Kugelextraktion aus der Punktwolke	26
3.1.1	Äußere Orientierung	29
3.2.1	Exemplarische Anwendung des Sobeloperators auf einen Bildausschnitt	33
3.2.2	Merkmalszuordnung unter Berücksichtigung der Nachbarschaft	34
4.2.1	Kombinations- und Fusionsmöglichkeiten von Bild- und Scandaten	38
4.3.1	Scan- und Bildmodell	40
4.3.2	Scandaten als Hauptinformationsträger	41
4.3.3	Bilddaten als Hauptinformationsträger	41
4.3.4	Nutzung hybrider Modelle	42
4.4.1	Scanner mit adaptierter Kamera	43
4.5.1	Darstellung unterschiedlicher Bildtypen	44
4.5.2	Relative Orientierung zwischen Kamera- und Scannerkoordinatensystem	45
5.2.1	Entwurf der Würfebenen	51
5.2.2	Würfelkonzept	51
5.2.3	Punktwolke und Kamerabild eines Passwürfels	52
5.3.1	Prototyp des Würfels	52
5.3.2	Messung des Würfels mit dem Scanner GOM-Atos III	53
5.3.3	Berechnete Winkelmaße und Punktabstände der Messung mit dem Scanner GOM-Atos III	54
6.1.1	Würfelstrukturbaum	57
6.1.2	Würfeltopologie – Würfelnetz mit Würfeckencodierung und mögliche Ansichten des Würfels	58
6.1.3	Würfelansichten	58
6.1.4	LG-Code	60
6.1.5	Codierung der Ebene unter Berücksichtigung der Ansicht des Würfels	60
6.2.1	Normalenvektor und Ebenenabstand	61
6.2.2	Bestimmung der Richtung des Kantenverlaufs	63
6.2.3	Modellierung der Kanten und Eckpunkte	64
6.3.1	Darstellung der Normalenvektoren im lokalen Scannerkoordinatensystem	66

6.3.2	Schematische Darstellung der Würfeckpunkte	66
6.3.3	Eckpunktfehler bei unterschiedlichen Fertigungstoleranzen	67
6.3.4	Fehler der x-Koordinate der Eckpunkte bei unterschiedlichen Fertigungstoleranzen . .	68
6.3.5	Fehler der y-Koordinate der Eckpunkte bei unterschiedlichen Fertigungstoleranzen . .	68
6.3.6	Fehler der z-Koordinate der Eckpunkte bei unterschiedlichen Fertigungstoleranzen . .	69
6.3.7	Einfluss der Fehler auf die Achsenschnittwinkel	69
6.3.8	Würfeckpunkte bei Lagerung auf Adapter	71
6.3.9	Abweichung vom Sollwinkel	71
6.3.10	Schematische Darstellung der Flächendiagonalen	73
7.1.1	Berechnungsschritte zur Bestimmung der codierten Eckpunkte eines Würfels	75
7.2.1	Manuelle Extraktion des Würfels aus der Punktwolke	76
7.2.2	Extraktion eines Würfels aus der Punktwolke	77
7.2.3	Eingabedatei	77
7.2.4	Anzahl der erfassbaren Würfebenen bei unterschiedlichen Sichten	78
7.3.1	Segmentierung der Einzelebenen	79
7.3.2	Beispielhafte Ausrichtung eines Würfels	80
7.3.3	Ebenensegmentierung mittels RANSAC-Algorithmus	81
7.3.4	Ebenenpunkte aller drei Ebenen nach Anwendung des RANSAC-Algorithmus	81
7.3.5	Bestimmung der Ebenenparameter	82
7.3.6	Residuen der Ebene 021 (weiß-grau) mit Normalverteilung $N\{0, 0.42\}$	84
7.3.7	Residuen der Ebene 013 (grau-weiß) mit Normalverteilung $N\{0, 0.43\}$	84
7.3.8	Residuen der Ebene 036 (schwarz-grau) mit Normalverteilung $N\{0, 1.2\}$	85
7.3.9	Residuenverteilung bei $\sigma_s = 2\text{mm}$	85
7.3.10	Berechnung der genäherten Eckpunktkoordinaten	86
7.3.11	Würfel mit Pseudocodierung	86
7.3.12	Segmentierung in Grund- und Symbolfläche	87
7.3.13	Position der Symbolfläche in Bezug zur Grundfläche	88
7.3.14	Trennung von Grund- und Symbolfläche	88
7.3.15	Ermittlung der helleren Teilfläche der Ebene	89
7.3.16	Grauwerte der Intensitäten	89
7.3.17	Intensitätswertverteilung der Ebene 021	89
7.3.18	Intensitätswertverteilung der Teilflächen der Ebene 021	90
7.3.19	Intensitätswertverteilung Ebene 013	90
7.3.20	Intensitätswertverteilung der Ebene 036	91
7.3.21	Ermittelte Intensitätswerte der Teilflächen der drei Ebenen	91
7.3.22	Bestimmung der Ebenenparameter der helleren Teilfläche	92
7.3.23	Teilflächensegmentierung	93
7.3.24	Residuen der weißen Symbolfläche der Ebene 013 (grau-weiß) mit $N\{0, 0.07\}$	93
7.3.25	Residuen der weißen Grundfläche der Ebene 021 (weiß-grau) mit $N\{0, 0.21\}$	93
7.3.26	Residuen der grauen Symbolfläche der Ebene 036 (schwarz-grau) mit $N\{0, 0.21\}$. . .	94
7.3.27	Endgültige Bestimmung der Eckpunktkoordinaten	94
7.4.1	Intensitätswertanalyse	96
7.4.2	Überblick der Codierungen	99
7.4.3	Einfluss des Auftreffwinkels auf die Intensitätswerte	100
7.4.4	Regressionsgeraden der Intensitätswerte der Testreihe (mit 95% Konfidenzintervall) .	100

7.4.5	Codierung der Eckpunkte	101
7.4.6	Darstellung der Punktwolke des Würfels in Cyclone mit den berechneten Kanten und Eckpunkten	102
7.4.7	Darstellung der Fehlerellipsoide der Eckpunkte	103
7.5.1	Zuordnung der ermittelten Eckpunkte über die Codierung	104
7.5.2	Restklaffungen nach Transformation mit vier Würfeln	105
8.1.1	Erfasste Scanpunkte für zwei unterschiedliche Würfel in ca. 7m Entfernung	110
8.1.2	Erfasste Scanpunkte für unterschiedliche Würfel in ca. 9.6m und 12m Entfernung	111
8.2.1	Würfelanordnung des Berechnungsbeispiels I	113
8.2.2	Anordnung der eingesetzten Black- and-White-Targets, Kugeln und Würfel (Berechnungsbeispiel I)	114
8.2.3	Schematische Anordnung der zur Transformation verwendeten Würfel	115
8.2.4	Restklaffungen der Eckpunkte nach Transformation mit vier Würfeln (Berechnungsbeispiel I)	116
8.2.5	Anordnung der erfassten Black- and-White-Targets, Kugeln und Würfel von Standpunkt S_1 (Berechnungsbeispiel II)	119
8.2.6	Restklaffungen nach Transformation mit vier Würfeln (Berechnungsbeispiel II)	120
8.2.7	Abweichungen von der Solllage nach Transformation	121
8.2.8	Differenzen zur Solllage bei Transformation mit einem Würfel (Transformation von S_4 nach S_1)	122
8.2.9	Messanordnung zur Prüfung des Einflusses der hinteren Eckpunkte auf die Transformationsparameter	123
8.2.10	Restklaffungen der Eckpunkte nach Transformation mit acht und vier Eckpunkten mit sechs Würfeln	124
8.2.11	Restklaffungen der Eckpunkte nach Transformation mit acht und vier Eckpunkten mit drei Würfeln	125
8.2.12	Restklaffungen gegenüberliegender Standpunkte nach Transformation mit drei Würfeln	126
9.2.1	Kantenfilterung und Hough-Transformation	129
9.2.2	Segmentierung der Würfelteilflächen mittels Watershed-Algorithmus	130
9.3.1	Gemeinsame Verwendungsmöglichkeiten von Bild- und Scandaten	132
9.3.2	Gemeinsame Verwendungsmöglichkeiten von Bild- und Scandaten II	133
B.1	Darstellung der Rotationswinkel um die Koordinatenachsen	164
C.1	Residuen der grauen Grundfläche der Ebene 013 (grau-weiß) mit Normalverteilung $N\{0, 0.26\}$	166
C.2	Residuen der grauen Symbolfläche der Ebene 021 (weiß-grau) mit Normalverteilung $N\{0, 0.33\}$	166
C.3	Residuen der schwarzen Grundfläche der Ebene 036 (schwarz-grau) mit Normalverteilung $N\{0, 1.34\}$	166

Tabellenverzeichnis

2.1.1	Auszug der Leistungsmerkmale des Laserscanners HDS 6000	12
2.2.1	Auflösungsstufen des HDS 6000	15
4.1.1	Komplementäre Eigenschaften von Bild- und Scandaten	37
6.1.1	Flächen- bzw. Grauwertcode	55
6.1.2	Codierung der Würfebenen	56
6.1.3	Codierung der Würfelkanten	56
6.1.4	Codierung der Würfeckpunkte	57
6.1.5	Mögliche Ebenenanordnungen	59
6.3.1	Eingabedatei für die Fehlerberechnung	65
6.3.2	Normalenvektorkomponenten mit Fehlerangaben in Altgrad	66
6.3.3	Ermittelte Punktfehler I	66
6.3.4	Normalenvektorkomponenten mit Fehlerangaben in Altgrad (Würfel auf Adapter) . .	70
6.3.5	Ermittelte Punktfehler II	71
6.3.6	Schnittwinkel zwischen den berechneten Kanten	72
6.3.7	Kontrolle der Strecken zwischen den Eckpunkten	73
7.3.1	Position der Symbolfläche relativ zur Grundfläche	88
7.3.2	Analyse der Intensitätswerte	92
7.3.3	Ermittelte Ebenenparameter nach der Ausgleichung der helleren Teilflächen	94
7.4.1	Variationsmöglichkeiten der Helligkeitsrelation von Grund- und Symbolfläche	98
7.4.2	Mögliche Ebenencodierung bei bekannter heller-dunkler-Relation der Teilflächen (Würfelansicht 0)	98
7.4.3	Mögliche Ebenencodierung bei bekannter heller-dunkler-Relation der Teilflächen (Würfelansicht 1)	99
7.4.4	Ergebnis nach abschließender Eckpunktcodierung	102
7.4.5	Kontrolle der Strecken zwischen den Eckpunkten	103
7.5.1	Ergebnisse der Helmert-Transformation	105
8.1.1	Gegenüberstellung unterschiedlicher Auflösungsstufen bei 5m, 7m und 12m	108
8.1.2	Mittlere und maximale Längenabweichung gescannter Würfel mit unterschiedlicher Ausrichtung und Entfernung	109
8.1.3	Schnittwinkel zwischen den berechneten Kanten der beiden Würfel	110
8.1.4	Bestimmung der Längenabweichungen zweier Würfel auf Adapter in 7m Entfernung .	111
8.1.5	Bestimmung der Längenabweichungen dreier Würfel auf Adapter	111
8.1.6	Schnittwinkel zwischen den berechneten Kanten von drei Würfeln	112
8.1.7	Ermittelte Längenabweichungen bei unterschiedlichen Entfernungen	112
8.2.1	Identifizierte Würfel pro Standpunkt (Berechnungsbeispiel I)	114
8.2.2	Ergebnisse der Transformation der Standpunkte S_1 und S_2 mit unterschiedlicher Würfelanzahl	115
8.2.3	Gegenüberstellung der Ergebnisse der Transformation von S_2 nach S_1 berechnet mit vier Würfeln, acht Black- and White-Targets bzw. sechs Kugeln	116
8.2.4	Gegenüberstellung der Ergebnisse der Transformation von S_2 nach S_1 mit drei Würfeln bzw. unterschiedlicher Anzahl an Black- and White-Targets	117
8.2.5	Längenabweichungen des Würfels W8 (weißer Würfel)	117
8.2.6	Identifizierte Black- and White-Targets pro Standpunkt (Berechnungsbeispiel II) . . .	118

8.2.7	Identifizierte Kugeln pro Standpunkt (Berechnungsbeispiel II)	118
8.2.8	Identifizierte Würfel pro Standpunkt (Berechnungsbeispiel II)	118
8.2.9	Gegenüberstellung der Ergebnisse der Transformation von S_2 nach S_1	119
8.2.10	Koordinatendifferenzen des weißen Würfels (Transformation von S_2 nach S_1)	120
8.2.11	Koordinatendifferenzen des weißen Würfels bei Berechnung der Transformationsparameter mit unterschiedlicher Würfelanzahl (Transformation von S_2 nach S_1)	121
8.2.12	Koordinatendifferenzen des weißen Würfels bei Transformation mit einem Würfel . . .	122
8.2.13	Gegenüberstellung der Ergebnisse der Helmert-Transformation	123
8.2.14	Ergebnisse der Transformation gegenüberliegender Standpunkte	126
8.2.15	Vergleich der Eckpunktkoordinaten bei unterschiedlicher Berechnung	127
A.1	K-Code-Lösungsmöglichkeiten bei bekannter Lage der Ebenen und heller-dunkler- Relation bei Würfelansicht 0	159
A.2	K-Code-Lösungsmöglichkeiten bei bekannter Lage der Ebenen und heller-dunkler- Relation bei Würfelansicht 0 bei Verwendung des LG-Codes	160
A.3	K-Code-Lösungsmöglichkeiten bei bekannter Lage der Ebenen und heller-dunkler- Relation bei Würfelansicht 1	161
A.4	K-Code-Lösungsmöglichkeiten bei bekannter Lage der Ebenen und heller-dunkler- Relation bei Würfelansicht 1 bei Verwendung des LG-Codes	162
A.5	Mögliche LG-Codes	163
D.1	Standardabweichungen der kompletten Ebenen und ihrer helleren Teilfläche	167
D.2	Prüfgrößen für den t-Test	168
E.1	Gegenüberstellung unterschiedlicher Auflösungsstufen bei 7m, 10m und 12m	169

Symbole

α	Auftreffwinkel
α_s	Schnittwinkel zwischen zwei Ebenen
λ	Laserwellenlänge
μ	geschätzter Erwartungsvert der Normalverteilung
$\phi(\lambda)$	spektraler Reflexionsgrad
$\Phi_e(\lambda)$	einfallender Strahlungsfluss
$\Phi_r(\lambda)$	reflektierter Strahlungsfluss
σ, σ^2	geschätzte Standardabweichung, Varianz der Normalverteilung
σ_s	Parameter, der den Schwellwert für den Abstand eines Punktes zur Ebene definiert
\mathbf{m}_0	Standardabweichung der Gewichtseinheit (mittlerer Gewichtseinheitsfehler)
\mathbf{n}	Normalenvektor der Ebene
\mathbf{R}	Rotationsmatrix
\mathbf{s}_0	Standardabweichung der Gewichtseinheit (mittlerer Gewichtseinheitsfehler) bei der Ebenenbestimmung
d	Abstand der Ebene vom Koordinatenursprung
D_0	Durchmesser des Laserstrahls beim Verlassen der Optik
$D(z)$	Durchmesser des Laserstrahls im Abstand z
k_{l_m}	mittlere Kantenlänge des Würfels
k_l	Kantenlänge des Würfels
L_{max}	maximale Längenabweichung
L_m	mittlere Längenabweichung
s_{ges}, s_{ges}^2	Standardabweichung, Varianz der gesamten Ebene
s_{kl}	Standardabweichung der Kantenlänge
s_{teil}, s_{teil}^2	Standardabweichung, Varianz der Ebenenteilfläche
w_{m_g}	mittlere Winkelabweichung [$^\circ$]
w_{m_m}	metrische Winkelabweichung bezogen auf die Kantenlänge

Abkürzungen

i, a	Flächenindex, der zur Berechnung verwendeten Teilfläche: innen, außen
lo, lu	Ebenenlagebezeichnungen: links oben, links unten
mo, mu	Ebenenlagebezeichnungen: mittig oben, mittig unten
ro, ru	Ebenenlagebezeichnungen: rechts oben, rechts unten
AD	Würfellagerung auf Adapter
BW	Black- and White-Target
CS	Consensus Set
EP	Würfeleckpunkt
GLOH	Gradient Location and Orientation Histogram
HD-Code	Codierung, welche die heller-dunkler-Relation von Grund- und Symbolfläche der drei erfassten Ebenen wiedergibt
ICP	Iterative Closest Point Algorithm
K	Kugel
LG-Code	Code, der die Ausrichtung des Würfels, die Lage der Ebene sowie deren Ebenencode enthält
LIDAR	LIght Detection And Ranging
RANSAC	RANdom SAMple Consensus
S	Scannerstandpunkt
SfM	Structure-from-Motion
SIFT	Scale Invariant Feature Transformation
TLS	Terrestrisches Laserscanning
W	Würfel

Literatur

- [Abd05] **Abdelhafiz, A. (2005)**: 3D-Image: As a result from the combination between the laser scanner point cloud and the digital photogrammetry, In: Gruen, A., Kahmen, H.: 7th Conference on Optical 3-D Measurement Techniques, Vienna, Austria.
- [Abd09] **Abdelhafiz, A. (2009)**: Integrating Digital Photogrammetry and Terrestrial Laser Scanning, Dissertation, Technische Universität Braunschweig.
- [Ack83] **Ackermann, F. (1983)**: High precision digital image correlation, Photogrammetrische Woche 1983, Schriftenreihe des Instituts für Photogrammetrie der Universität Stuttgart, Heft 9, <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/phowo83/ackermann.pdf> (Zugriff 12/2011).
- [AF06] **Al-Manasir, K., Fraser, C. (2006)**: Automatic registration of terrestrial scanner data via imagery, ISPRS Workshop "Image Engineering and Vision Metrology", Dresden, Germany.
- [AGD07] **Azad, P., Gockel, T., Dillmann, R. (2007)**: Computer Vision - Das Praxisbuch, Elektor Verlag, Aachen.
- [AGL07] **Aguilera, D., González, P., Lahoz, J. (2007)**: Automatic co-registration of terrestrial laser scanner and digital camera for the generation of hybrid models, ISPRS Workshop „Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007“, Espoo, Finland.
- [AHF07] **Alshawabkeh, Y., Haala, N., Fritsch, D. (2007)**: Registrierung terrestrischer Bild und LIDAR Daten für die Dokumentation von Kulturdenkmälern, Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (PFG), Vol. 3, S. 199-208.
- [Akc03] **Akca, D. (2003)**: Full automatic registration of laser scanner point clouds, In: Gruen, A., Kahmen, H.: Optical 3-D Measurement Techniques VI, Zurich, Switzerland, vol. I, pp. 330-337.
- [Als06] **Alshawabkeh, Y. (2006)**: Integration of laserscanning and photogrammetry for heritage documentation, Dissertation, Universität Stuttgart.
- [AN06] **Abdelhafiz, A., Niemeier, W. (2006)**: 3D reconstruction of a real traffic cross section based on the combination between the laser scanner point cloud and the digital photos, www.igp.tu-bs.de/institut/images/2006-2.pdf (Zugriff 12/2008).
- [And00] **Andreß, H.-J. (2000)**: Tabelle der F-Verteilung, <http://psydok.sulb.uni-saarland.de/volltexte/2004/268/html/fvert3.htm#95b> (Zugriff 08/2011).
- [AW09] **Albertz, J., Wiggenhagen, M. (2009)**: Taschenbuch zur Photogrammetrie und Fernerkundung – Guide for Photogrammetry and Remote Sensing, 5., völlig neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Wichmann Verlag, Heidelberg.
- [Bal12] **Baltsavias, E. (2012)**: Matching Verfahren und automatische DTM Generierung, Vorlesungsmaterialien: Bildverarbeitung, Computer Vision and Geometry Group der ETH Zürich, http://www.cvg.ethz.ch/teaching/2012spring/bv/slides/matching1_2012.pdf (Zugriff 06/2012).
- [Bar07] **Barski, A. (2007)**: Seminar Intelligente Industrieroboter, Vorlesungsskript Wintersemester 07/08, Institut für Prozessrechentchnik, Automation und Robotik der Universität Karlsruhe, http://iirrob.ira.uka.de/joomla_1.0.11/index.php?option=com_docman&task=doc_view&gid=21&Itemid=33 (Zugriff 12/2011).
- [Bar12] **Barthel, K. (2012)**: Vorlesungsmaterialien des Internationalen Studienganges Medieninformatik, Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, <http://people.f4.htw-berlin.de/~barthel/veranstaltungen/ComputerVision/> (Zugriff 06/2012).
- [BB06] **Becker, R., Benning, W. (2006)**: Simultane Auswertung von photogrammetrischen und Laserscanningdaten, Terrestrisches Laser-Scanning (TLS 2006), DVW-Schriftenreihe Band 51/2006, S. 45-54, DVW e.V. - Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Wißner-Verlag, Augsburg.
- [BBE04] **Becker, R., Benning, W., Effkemann, C. (2004)**: 3D-Monoplotting – Kombinierte Auswertung von Laserscannerdaten und photogrammetrischen Aufnahmen, ZFV 2004 – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement.
- [BBM03] **Böhler, W., Bordas Vicent, M., Marbs, A. (2003)**: Investigating laser scanner accuracy, Proceedings of the XIXth CIPA International Symposium, Antalya, Türkei.

- [Bec05] **Becker, R. (2005)**: Differentialgeometrische Extraktion von 3D-Objektprimitiven aus terrestrischen Laserscannerdaten, Dissertation, Technische Hochschule Aachen.
- [Beu92] **Beucher, S. (1992)**: The Watershed Transformation applied to image segmentation, 10th Pfefferkorn Conference on Signal and Image Processing in Microscopy and Microanalysis, 16-19 Sept. 1991, Cambridge, UK, Scanning Microscopy International, supplement 6, 1992, pp. 299-314., <http://www.cs.tut.fi/~selinumm/biolab/pfefferkorn.pdf> (Zugriff 12/2011).
- [BF07] **Barnea, S., Filin, S. (2007)**: Registration of terrestrial laser scans via image based features, ISPRS Workshop „Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007“, Espoo, Finland.
- [Böh05a] **Böhler, W. (2005)**: Vergleichende Untersuchungen zur Genauigkeit und Auflösung von Laserscannern, Terrestrisches Laser-Scanning (TLS) – Ein geodätisches Messverfahren mit Zukunft, DVW-Schriftenreihe Band 48/2005, S. 17-28, DVW e.V. - Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Wißner-Verlag, Augsburg.
- [Böh05b] **Böhm, J. (2005)**: Modellbasierte Segmentierung und Objekterkennung aus Distanzbildern, Dissertation, Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart.
- [BL79] **Beucher, S., Lantuejoul, C. (1979)**: Use of watersheds in contour detection, International Workshop on Image Processing: Real-time edge and motion detection/estimation, Rennes, France, 17-21 Sep. 1979, <http://cmm.enscm.fr/~beucher/publi/watershed.pdf> (Zugriff 12/2011).
- [BL02] **Brown, M., Lowe, D. (2002)**: Invariant features from interest point groups, British Machine Vision Conference BMVC, Cardiff, Wales, September 2002, pp. 656-665, <http://www.cs.ubc.ca/~lowe/papers/brown02.pdf> (Zugriff 12/2011).
- [BL04] **Bae, K.H., Lichti, D. (2004)**: Automated registration of unorganised point clouds from terrestrial laser scanners, XXth ISPRS Congress, Istanbul, Turkey.
- [BM92] **Besl, P., McKay, N. (1992)**: A method for registration of 3-D shapes, IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 14, no. 2, pp. 239-256.
- [Boo01] **Boochs, F. (2001)**: Ein Verfahren zur automatischen Detektion von kubischen Verknüpfungsobjekten in digitalen Farbmessbildern, DGPF-Publikationen, Vol. 11, http://www.i3mainz.fh-mainz.de/publicat/itg01/paper_itg01.pdf (Zugriff 12/2011).
- [Bre05] **Brenner, C. (2005)**: Building reconstruction from images and laser scanning, International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation, vol. 6, issue 3-4, pp. 187-198.
- [BSMM08] **Bronstein, I., Semendjajew, K., Musiol, G., Mühlig, H. (2008)**: Taschenbuch der Mathematik, 7., vollständig überarbeitete und ergänzte Auflage, Verlag Harri Deutsch, Frankfurt am Main.
- [BT01] **Boochs, F., Twardochlib, M. (2001)**: Bildgestützte Erkennung und Vermessung von 3-dimensionalen Targets, <http://www.i3mainz.fh-mainz.de/projekte/3dtarget/abschlussbericht.html> (Zugriff 08/2010).
- [Buc09] **Buck, U. (2009)**: Laserscanner in der Kriminalistik, Terrestrisches Laserscanning (TLS 2009) Yes, we Scan!, Beiträge zum 91. DVW Seminar am 19. und 20. November in Fulda, DVW Schriftenreihe Band 60/2009, S. 205-224.
- [BV05] **Bähr, H.-P., Vögtle, T. (2005)**: Digitale Bildverarbeitung: Anwendungen in Photogrammetrie, Fernerkundung und GIS, 4. Auflage, Wichmann Verlag, Heidelberg.
- [Can86] **Canny, J. (1986)**: A computational approach to edge detection, IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 8, no. 6, pp. 679-698.
- [Con04] **Conseil, N. (2004)**: Der terrestrische Laserscanner MENSIS GS 100 – Untersuchungen über den Einfluss unterschiedlicher Oberflächeneigenschaften auf die Punktbestimmung, Diplomarbeit, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Fachbereich Geomatik.
- [CYP04] **Chen, Q., Yang, X., Petriu, E.M. (2004)**: Watershed segmentation for binary images with different distance transforms, Proceedings of the 3rd IEEE International Workshop „Haptic, audio and visual environments and their applications“, 2-3 Oct. 2004, pp. 111-116.
- [DB04] **Dold, C., Brenner, C. (2004)**: Automatic matching of terrestrial scan data as a basis for the generation of detailed 3D city models, ISPRS Workshop „Geo-Imagery Bridging Continents“, Istanbul, Turkey.

- [DB06] **Dold, C., Brenner, C. (2006)**: Registration of terrestrial laser scanning data using planar patches and image data, ISPRS Symposium "Image Engineering and Vision Metrology", Dresden, Germany.
- [DH71] **Duda, R.O., Hart, P.E. (1971)**: Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures, Technical Note 36, <http://www.ai.sri.com/pubs/files/tn036-duda71.pdf> (Zugriff 12/2011).
- [DLZ08] **Ding, M., Lyngbaek, K., Zakhor, A. (2008)**: Automatic registration of aerial imagery with untextured 3D LiDAR models, IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 1-8, June 2008.
- [Dri93] **Drixler, E. (1993)**: Analyse der Form und Lage von Objekten im Raum, Dissertation, Universität Karlsruhe.
- [DSTT00] **Dellaert, F., Seitz, S., Thorpe, C., Thrun, S. (2000)**: Structure from Motion without Correspondence, IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, http://www.ri.cmu.edu/pub_files/pub2/dellaert_frank_2000_1/dellaert_frank_2000_1.pdf (Zugriff 10/2012).
- [EK09] **El Khrachy, I. (2009)**: Towards an automatic registration for terrestrial laser scanner data, Dissertation, Technische Universität Braunschweig.
- [Eli09] **Eling, D. (2009)**: Terrestrisches Laserscanning für die Bauwerksüberwachung, Dissertation, Leibniz Universität Hannover.
- [Enc97] **Encarnacao, J. (1997)**: Graphische Bildverarbeitung 2 – Modellierung komplexer Objekte und photorealistische Bilderzeugung, 4.Auflage, Oldenbourg Verlag, München.
- [Erd10] **Erdas (2010)**: LPS Project Manager User's Guide.
- [Est12] **Esteban, I. (2012)**: Multiple view geometry and 3d reconstruction for matlab, <http://www.fit3d.info/> (Zugriff 10/2012).
- [Far09] **Faro (2009)**: Faro Targets, http://www.faro.com/FaroIP/Files/File/catalogs_english/FARO_LS_Catalog.pdf (Zugriff 12/2011).
- [Far10] **Faro (2010)**: FaroScene, <http://www.faro.com/content.aspx?ct=ge&content=pro&item=5&subitem=48> (Zugriff 12/2011).
- [Fau93] **Faugeras, O. (1993)**: Three-dimensional computer vision - a geometric viewpoint, Massachusetts Institute of Technology Press.
- [FB80] **Fischler, M., Bolles, R. (1980)**: Random Sample Consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography, Technical Note - Artificial Intelligence Center SRI International.
- [Fer11] **Fera, M. (2011)**: Structure from Motion - aktuelle Ansätze zur dreidimensionalen Dokumentation stratigraphischer Grabungen, Kolloquium im Rahmen der TOPOI Forschungsgruppe A-III WS 2011/2012, <http://www.topoi.org/wp-content/uploads/2011/10/Fera.pdf> (Zugriff 10/2012).
- [FG87] **Förstner, W., Gülch, E. (1987)**: A fast operator for detection and precise location of distinct points, corners and centres of circular features, ISPRS Conference on Fast Processing of Photogrammetric Data, Interlaken, Switzerland, <http://www.ipb.uni-bonn.de/fileadmin/publication/papers/1987/foerstner87.fast.pdf> (Zugriff 12/2011).
- [FP08] **Furukawa, Y., Ponce, J. (2008)**: Patch-based bundle adjustment software (pba), <http://homes.cs.washington.edu/~furukawa/research/pba/index.html> (Zugriff 10/2012).
- [FP09] **Furukawa, Y., Ponce, J. (2009)**: Accurate camera calibration from multi-view stereo and bundle adjustment, <http://homes.cs.washington.edu/~furukawa/papers/ijcv08a.pdf> (Zugriff 10/2012).
- [FP10] **Furukawa, Y., Ponce, J. (2010)**: Patch-based multi-view stereo software (pmvs - version 2), <http://grail.cs.washington.edu/software/pmvs/> (Zugriff 10/2012).
- [Fra12] **Franz, M.O. (2012)**: Industrielle Bildverarbeitung, Vorlesungsskript Sommersemester 2012, HTWG Konstanz, http://www.ios.htwg-konstanz.de/joomla_mof/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=38&Itemid=103 (Zugriff 06/2012).

- [Fur10] **Furukawa, Y. (2010)**: Clustering views for multi-view stereo (cmvs), <http://grail.cs.washington.edu/software/cmvs/> (Zugriff 10/2012).
- [Geo09] **Geomagic (2009)**: Geomagic Studio und Geomagic Wrap, http://dl.geomagic.com/media/marketing/2012_Brochures/Studio_Wrap_2012_DE.pdf (Zugriff 12/2011).
- [GIM07] **GIM International (2007)**: Terrestrial Laser Scanners: August 2007, Volume 21, Issue 8, http://www.gim-international.com/files/productsurvey_v_pdfdocument_18.pdf (Zugriff 12/2011).
- [GIM10] **GIM International (2010)**: Terrestrial Laser Scanners, August 2010, http://www.gim-international.com/productsurvey/id41-Terrestrial_Laser_Scanners,_August.html (Zugriff 12/2011).
- [GIM11] **GIM International (2011)**: <http://www.gim-international.com/productsurvey/index.php> (Zugriff 12/2011).
- [GLB01] **Godin, G., Laurendeau, D., Bergevin, R. (2001)**: A method for the registration of attributed range images, Third International Conference on 3D Imaging, Québec, Canada, pp. 179–186.
- [GOM11] **GOM (2011)**: Systemübersicht – GOM-Scanner ATOS, <http://www.gom.com/de/messsysteme/systemuebersicht/atos-compact-scan.html> (Zugriff 12/2011).
- [Gor08] **Gordon, B. (2008)**: Zur Bestimmung von Messunsicherheiten terrestrischer Laserscanner, Dissertation, Technische Universität Darmstadt.
- [Gür02] **Güring, J. (2002)**: 3D-Erfassung und Objektrekonstruktion mittels Streifenprojektion, Dissertation, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart.
- [Gre05] **Gremse, F. (2005)**: Skaleninvariante Merkmalstransformation - SIFT Merkmale, Hauptseminar im Sommersemester 2005 Medizinische Bildverarbeitung, Technische Hochschule Aachen, http://ganymed.imib.rwth-aachen.de/lehmann/seminare/bv_2005-08.pdf (Zugriff 12/2011).
- [Har07] **Haring, A. (2007)**: Die Orientierung von Laserscanner- und Bilddaten bei der fahrzeuggestützten Objekterfassung, Dissertation, Technische Universität Wien.
- [Hei06] **Heister, H. (2006)**: Zur standardisierten Überprüfung von terrestrischen Laserscannern (TLS), Terrestrisches Laser-Scanning (TLS 2006), DVW-Schriftenreihe Band 51/2006, S. 35-44, DVW e.V. - Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Wißner-Verlag, Augsburg.
- [HN07] **Hesse, C., Neumann, I. (2007)**: Automatische Objekterfassung und Modellierung durch kinematisches Laserscanning, Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2007, Luhmann/Müller (Hrsg.), S. 278-287, Wichmann Verlag, Heidelberg.
- [Hou62] **Hough, P.V.C. (1962)**: Method and means for recognizing complex patterns, U.S. Patent 3.069.654.
- [Höp80] **Höpcke, W. (1980)**: Fehlerlehre und Ausgleichsrechnung, de Gruyter Verlag, Berlin, New York.
- [HP03] **Hofer, M., Pottmann, H. (2003)**: Orientierung von Laserscanner-Punktwolken, Universitätslehrgang Laserscanning des Instituts für Photogrammetrie und Fernerkundung der Technischen Universität Wien.
- [HS88] **Harris, C., Stephens, M. (1988)**: A combined corner and edge detector, Proceedings of the 4th Alvey Vision Conference (AVC88), Univ. Manchester, Aug. 31-Sept. 2, 1988, pp. 147-151, <http://www.bmva.org/bmvc/1988/avc-88-023.pdf> (Zugriff 12/2011).
- [HS08] **Hauth, S., Siegrist, B. (2008)**: Anwendung von Laserscanning und Photogrammetrie in der Denkmalpflege am Beispiel der Porta Nigra, Diplomarbeit, Studiengang Geoinformatik und Vermessung, Fachhochschule Mainz.
- [HZ03] **Hartley, R.I., Zisserman, A. (2003)**: Multiple View Geometry in Computer Vision, 2. edn., Cambridge University Press, Cambridge.
- [Inn11] **InnovMetric Software Inc. (2011)**: PolyWorks, <http://www.innovmetric.com/polyworks/3D-scanners/home.aspx?lang=en> (Zugriff 12/2011).
- [IW09] **Ingensand, H., Wunderlich, T. (2009)**: Scanner – und was kommt danach?, Terrestrisches Laserscanning (TLS 2009) Yes, we Scan!, Beiträge zum 91. DVW Seminar am 19. und 20. November in Fulda, DVW Schriftenreihe Band 60/2009, S. 3-12.

- [JC08] **Jaw, J.J., Cheng, C.C. (2008):** Building roof reconstruction by fusing laser range data and aerial images, XXist ISPRS Congress Technical Commission III vol. XXXVII, part 3B, pp. 707-712, Beijing, China, http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/3b_pdf/120.pdf (Zugriff 10/2012).
- [JF08] **Jazayeri, I., Fraser, C.S. (2008):** Interest Operators in close-range object reconstruction, XXist ISPRS Congress, Technical Commission V, WG V/1 Industrial Vision Metrology Systems and Applications, vol. XXXVII, part B5, pp. 69-74, Beijing, China, http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/5_pdf/12.pdf (Zugriff 12/2011).
- [JMNS96] **Jähne, B., Massen, R., Nickolay, B., Scharfenberg, H. (1996):** Technische Bildverarbeitung - Maschinelles Sehen, Springer Verlag, Berlin.
- [JSF⁺04] **Jansa, J., Studnicka, N., Forkert, G., Haring, A., Kager, H. (2004):** Terrestrial laser-scanning and photogrammetry – Acquisition techniques complementing one another, XXth ISPRS Congress "Geo-Imagery Bridging Continents", Istanbul, Turkey.
- [JSH08] **Joeckel, R., Stober, M., Huep, W. (2008):** Elektronische Entfernungs- und Richtungsmessung und ihre Integration in aktuelle Positionierungsverfahren, 5., neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Wichmann Verlag, Heidelberg.
- [Jut07] **Jutzi, B. (2007):** Analyse der zeitlichen Signalform von zurückgestreuten Laserpulsen, Dissertation, Technische Universität München.
- [Ker03] **Kern, F. (2003):** Automatisierte Modellierung von Bauwerksgeometrien aus 3D-Laserscanner-Daten, Dissertation, Geodätische Schriftenreihe der Technischen Universität Braunschweig, Heft 19.
- [Ker08] **Kern, F. (2008):** Prüfen und Kalibrieren von terrestrischen Laserscannern, Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2008, Luhmann/Müller (Hrsg.), Wichmann Verlag, Heidelberg, S. 306-316.
- [Ker09] **Kern, F. (2009):** Prüfrichtlinie zur Abnahme und Überwachung von terrestrischen Laserscanner-Systemen – ENTWURF V1.0.0 –, Tech. Rep., Institut für Raumbezogene Informations- und Messtechnik, Mainz.
- [KH06] **Kuhlmann, H., Husen, B. (2006):** Terrestrisches Laserscanning zur Bestimmung der Fahrbahnoberflächen, Terrestrisches Laser-Scanning (TLS 2006), DVW-Schriftenreihe Band 51/2006, S. 87-100, DVW e.V. - Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Wißner-Verlag, Augsburg.
- [KH08] **Kern, F., Huxhagen, U. (2008):** Zur standardisierten Überprüfung von terrestrischen Laserscannern (TLS), Terrestrisches Laser-Scanning (TLS 2008), DVW-Schriftenreihe Band 54/2008, S. 111-124, DVW e.V. - Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Wißner-Verlag, Augsburg.
- [Kho07] **Khoshelham, K. (2007):** Extending generalized Hough transform to detect 3D objects in laser range data, IAPRS Workshop „Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007“.
- [KPL06] **Kersten, T., Przybilla, H.J., Lindstaedt, M. (2006):** Integration, Fusion und Kombination von terrestrischen Laserscannerdaten und digitalen Bildern, Workshop "Anforderungen an geometrische Fusionsverfahren", DIN Deutsches Institut für Normung e.V. und Humboldt-Universität zu Berlin.
- [KR04] **Kampmann, G., Renner, B. (2004):** Vergleich verschiedener Methoden zur Bestimmung ausgleichender Ebenen und Geraden, Allgemeine Vermessungsnachrichten AVN, 02/2004, Wichmann Verlag, Berlin – Offenbach, S. 56-67.
- [Kra04] **Kraus, K. (2004):** Photogrammetrie Band 1 – Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen, 7., vollständig bearbeitete und erweiterte Auflage, Walter de Gruyter, Berlin – New York.
- [Kös07] **Köstner, A. (2007):** Spezielle Anforderungen bei der Tatort erfassung mit einem Laser-Scanner und der anschließenden Visualisierung gewonnener Daten, Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2007, Luhmann/Müller (Hrsg.), S. 270-277, Wichmann Verlag, Heidelberg.
- [KSHM10] **Kern, F., Siegrist, B., Huxhagen, U., Mehlig, S. (2010):** Genauigkeitsvergleich verschiedener Zielmarkendesigns, Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, 117, Heft 5, 2010, S. 170-175.

- [KSMAP04] **Kersten, T., Sternberg, H., Mechelke, K., Acevedo Pardo, C. (2004):** Terrestrischer Laserscanner Mensi GS100/GS200 – Untersuchungen und Projekte an der HAW Hamburg, Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2004, Luhmann (Hrsg.), Wichmann Verlag, Heidelberg, S. 98-107.
- [KTMG02] **Kern, F., Thomsen, S., Mittelstädt, D., Gay, O. (2002):** Integrierte Auswertung von Laserscanner- und Bilddaten für das Facility-Management, Photogrammetrie und Laserscanning, Anwendung für As-Built-Dokumentation und Facility Management, Luhmann (Hrsg.), S. 107-117, Wichmann Verlag, Heidelberg.
- [Kut07] **Kutterer, H. (2007):** Kinematisches Terrestrisches Laserscanning – Stand und Potenziale, Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2007, Luhmann/Müller (Hrsg.), S. 2-9, Wichmann Verlag, Heidelberg.
- [LA09] **Lourakis, M.I.A., Argyros, A.A. Sba: A software package for generic sparse bundle adjustment,** ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS), vol. 36, no. 1, pp. 1-30, March 2009, (2009), <http://www.ics.forth.gr/~lourakis/sba/sba-toms.pdf> (Zugriff 10/2012).
- [Lei10] **Leica (2010):** Leica Geosystems: Datenblatt HDS 6000, http://www.grad-gon.de/brochures/leica/hds6000_brochure_de.pdf (Zugriff 12/2011).
- [Lei11a] **Leica (2011):** Leica Geosystems: Datenblatt HDS 7000, http://hds.leica-geosystems.com/downloads123/hds/hds/HDS7000/brochures-datasheet/HDS7000_DAT_de.pdf (Zugriff 12/2011).
- [Lei11b] **Leica (2011):** Leica Geosystems: Leica Cyclone – 3D Point Cloud Processing Software, http://www.leica-geosystems.com/en/Leica-Cyclone_6515.htm (Zugriff 12/2011).
- [Lei11c] **Leica (2011):** Leica Targets, http://hds.leica-geosystems.com/en/Targets_19143.htm (Zugriff 12/2011).
- [Low99] **Lowe, D. (1999):** Object recognition from local scale-invariant features, Proceedings of the International Conference on Computer Vision, vol. 2, pp. 1150–1157, <http://www.cs.ubc.ca/~lowe/papers/iccv99.pdf> (Zugriff 12/2011).
- [Low04] **Lowe, D. (2004):** Distinctive image features from scale-invariant keypoints, International Journal of Computer Vision, vol. 60, issue 2, 2004, pp. 91-110, <http://www.cs.ubc.ca/~lowe/papers/ijcv04.pdf> (Zugriff 12/2011).
- [LS05] **Liu, L., Stamos, I. (2005):** Automatic 3d to 2d registration for the photorealistic rendering of urban scenes, Proceedings of the 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, vol. 2, pp. 137-143, San Diego, June 2005.
- [LS10] **Lichti, D., Skaloud, J. (2010):** Registration and calibration, Airborne and Terrestrial Laser Scanning, Vosselmann/Maas (Eds.), CRC Press, pp. 83-133.
- [Luh03] **Luhmann, T. (2003):** Nahbereichsphotogrammetrie: Grundlagen, Methoden und Anwendungen, 2. überarbeitete Auflage, Wichmann Verlag, Heidelberg.
- [Luh10a] **Luhmann, T. (2010):** Kombination von Laserscanning und Photogrammetrie – Potenziale und Grenzen, Terrestrisches Laserscanning – TLS 2010 mit TLS-Challenge, Beiträge zum 101. DVW Seminar am 6. und 7. Dezember 2010 in Fulda, DVW Schriftenreihe Band 64/2010.
- [Luh10b] **Luhmann, T. (2010):** Nahbereichsphotogrammetrie: Grundlagen, Methoden und Anwendungen, 3., völlig neubearbeitete und erweiterte Auflage, Wichmann Verlag, Berlin - Offenbach.
- [LYWZ06] **Liu, L., Yu, G., Wolberg, G., Zokai, S. (2006):** Multiview geometry for texture mapping 2d images onto 3d range data, Proceedings of the 2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, vol. 2, pp. 2293-2300, New York, June 2006.
- [Maa97] **Maas, H.G. (1997):** Mehrbildtechniken in der digitalen Photogrammetrie, Habilitationsschrift der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich.
- [Mat08] **Matlab-Website (2008):** <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange> (Zugriff 12/2008).
- [Mat11a] **Mathworks (2011):** MathWorks – Matlab-Webseite, <http://www.mathworks.de/products/matlab/index.html> (Zugriff 12/2011).
- [Mat11b] **Matlab – Image Processing Toolbox (2011):** <http://www.mathworks.de/products/image/> (Zugriff 12/2011).

- [Men04] **Mensi (2004)**: Datenblatt 3Dipsos 3.0, http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-146213/3DI_new.pdf (Zugriff 12/2011).
- [Mey02] **Meyer, F. (2002)**: Image Segmentation based on viscous flooding simulation, Proceedings of ISMM 2002, Talbot/Beare (Eds.).
- [MKF05] **Mastin, A., Kepner, J., Fisher, J. (2005)**: Automatic registration of LIDAR and optical images of urban scenes, IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 2639-2646, June 2009.
- [MKL08] **Mechelke, K., Kersten, T., Lindstaedt, M. (2008)**: Geometrische Genauigkeitsuntersuchungen neuester terrestrischer Laserscannersysteme – Leica ScanStation und Z+F Imager 5006, Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2008, Luhmann/Müller (Hrsg.), Wichmann Verlag, Heidelberg, S. 317-328.
- [MMSW00] **Möser, M., Müller, G., Schlemmer, H., Werner, H. (2000)**: Handbuch Ingenieurgeodäsie, 3., völlig neubearbeitete und erweiterte Auflage, Wichmann Verlag, Heidelberg.
- [Mor77] **Moravec, H.P. (1977)**: Towards automatic visual obstacle avoidance, Proceedings of the 5th International Joint Conference on Artificial Intelligence, Cambridge, MA, USA, August 1977, p. 584.
- [MS05] **Mikolajczyk, K., Schmid, C. (2005)**: A performance evaluation of local descriptors, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 27, issue 10, pp. 1615-1630.
- [MTS⁺05] **Mikolajczyk, K., Tuytelaars, T., Schmid, C., Zisserman, A., Matas, J., Schaffalitzky, F., Kadir, T., Van Gool, L. (2005)**: A comparison of affine region detectors, International Journal of Computer Vision, vol. 65, issue 1-2, November 2005, pp. 43-72, <http://www.robots.ox.ac.uk/~vgg/publications/papers/mikolajczyk05.pdf> (Zugriff 06/2012).
- [MW99] **Merziger, G., Wirth, T. (1999)**: Repetitorium der höheren Mathematik, 4. Auflage, Binomi Verlag, Springe.
- [Nei06] **Neitzel, F. (2006)**: Untersuchung des Achssystems und des Taumelfehlers terrestrischer Laserscanner mit tachymetrischem Messprinzip, Terrestrisches Laser-Scanning (TLS 2006), DVW-Schriftenreihe Band 51/2006, S. 15-34, DVW e.V. - Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Wißner-Verlag, Augsburg.
- [Nie02] **Niemeier, W. (2002)**: Ausgleichsrechnung: eine Einführung für Studierende und Praktiker des Vermessungs- und Geoinformationswesens, Walter de Gruyter, Berlin.
- [Nie05] **Niemeier, W. (2005)**: Modellierung – Ableitung geometrischer Informationen aus Punktwolken, Terrestrisches Laser-Scanning (TLS) – Ein geodätisches Messverfahren mit Zukunft, DVW-Schriftenreihe Band 48/2005, S. 81-94, DVW e.V. - Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Wißner-Verlag, Augsburg.
- [OWH⁺10] **Ok, A.O., Wegner, J.D., Heipke, C., Rottensteiner, F., Soergel, U., Toprak, V. (2010)**: A stereo line matching technique for arial images based on a pair-wise relation approach, ISPRS Istanbul Workshop 2010 „Modeling of optical airborne and spaceborne sensors“, WG I/4, Oct. 11-13, Istanbul, Turkey, IAPRS vol. XXXVIII-1/W17, http://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/1-W17/3_0k.pdf (Zugriff 06/2012).
- [Prz05] **Przybilla, H.J. (2005)**: Fusion von terrestrischem Laserscanning und digitaler Photogrammetrie, Terrestrisches Laser-Scanning (TLS) – Ein geodätisches Messverfahren mit Zukunft, DVW-Schriftenreihe Band 48/2005, S. 95-105, DVW e.V. - Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Wißner-Verlag, Augsburg.
- [Prz07] **Przybilla, H.J. (2007)**: Streifenprojektion - Grundlagen, Systeme und Anwendungen, Terrestrisches Laserscanning (TLS 2007) – Ein Messverfahren erobert den Raum, Beiträge zum 74. DVW-Seminar am 5. und 6. Dez. 2007 in Fulda, Band 53, S. 111-122.
- [PTVF07] **Press, W.H., Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T., Flannery, B.P. (2007)**: Numerical Recipes – The Art of Scientific Computing, Cambridge University Press, Third Edition.
- [PV09] **Pu, S., Vosselman, G. (2009)**: Refining building facade models with images, Proceedings of the City Models, Roads and Traffic Conference, IAPRS vol. XXXVIII, part 3/W4, pp. 217-222, http://www.pf.bv.tum.de/isprs/cmrt09/pub/CMRT09_Pu_Vosselman.pdf (Zugriff 10/2012).
- [PVV⁺04] **Pollefeys, M., Van Gool, L., Vergauwen, M., Verbiest, F., Cornelis, K., Tops, J., Koch, R. (2004)**: Visual modeling with a hand-held camera, International Journal of Computer Vision 59 (3), pp. 207-232, <http://www.cs.unc.edu/~marc/pubs/PollefeysIJCV04.pdf> (Zugriff 10/2012).

- [Rab06] **Rabbani, T. (2006)**: Automatic reconstruction of industrial installations using point clouds and images, Dissertation, TU Delft.
- [Rab12] **Rabaud, V. (2012)**: Structure from motion toolbox for matlab, <http://code.google.com/p/vincent-structure-from-motion-matlab-toolbox/> (Zugriff 10/2012).
- [RD06] **Rosten, E., Drummond, T. (2006)**: Machine learning for high-speed corner detection, European Conference on Computer Vision, pp. 430–443, http://www.edwardrosten.com/work/rosten_2006_machine.pdf (Zugriff 10/2012).
- [RHBR06] **Ressl, C., Haring, A., Briese, C., Rottensteiner, F. (2006)**: A concept for adaptive mono-plotting using images and laserscanner data, ISPRS Symposium "Photogrammetric Computer Vision", Bonn, Germany.
- [Rie04] **Rietdorf, A. (2004)**: Automatisierte Auswertung und Kalibrierung von scannenden Messsystemen mit tachymetrischem Messprinzip, Dissertation, Technische Universität Berlin.
- [Rie06] **Riemenschneider, A. (2006)**: Erfassung der Gleisgeometrie aus Laserscandaten, Terrestrisches Laser-Scanning (TLS 2006), DVW-Schriftenreihe Band 51/2006, S. 101-112, DVW e.V. - Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Wißner-Verlag, Augsburg.
- [Rie10] **Riegl Laser Measurement Systems GmbH (2010)**: Datenblatt RiSCAN PRO, http://www.riegl.com/uploads/tx_pxprigldownloads/11_DataSheet_RiSCAN-PRO_22-09-2010_02.pdf (Zugriff 12/2011).
- [RL01] **Rusinkiewicz, S., Levoy, M. (2001)**: Efficient Variants of the ICP Algorithm, <http://www.cs.princeton.edu/~smr/papers/fasticp/> (Zugriff 12/2011).
- [Rön07] **Rönnholm, P. and Honkavaara, E. and Litkey, P. and Hyypä, J. (2007)**: Integration of laser scanning and photogrammetry, ISPRS Workshop "Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007", Espoo, Finland.
- [RSK10] **Reich, T., Schumann, C., Krämer, C. (2010)**: Untersuchungen über Objekteinflüsse auf die Messqualität von Terrestrischen Laserscannern, Projektarbeit am Studiengang Geoinformatik und Vermessung der Fachhochschule Mainz.
- [Rv05] **Rabbani, T., van den Heuvel, F. (2005)**: Automatic point cloud registration using constrained search for corresponding objects, Proceedings of 7th Conference on Optical 3-D Measurement Techniques, October 3-5, 2005, Vienna, Austria, <http://internationalisation.ewi.tudelft.nl/live/binaries/7682790e-6925-44f4-8601-b98086ba5e03/doc/Optical3dTahir-1.pdf> (Zugriff 11/2011).
- [SA00] **Stamos, I., Allen, P. (2000)**: 3-D model construction using range and image data, IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'00), vol. 1.
- [SA01] **Stamos, I., Allen, P.K. (2001)**: Automatic registration of 2-D with 3-D imagery in urban environments, Proceedings of the Eighth IEEE International Conference on Computer Vision ICCV 2001, vol. 2, pp. 731-737, Vancouver, Canada, July 2001.
- [SA02] **Stamos, I., Allen, P.K. (2002)**: Geometry and texture recovery of scenes of large scale, Computer Vision and Image Understanding 88, pp. 94–118.
- [SB97] **Smith, S.M., Brady, M. (1997)**: SUSAN - a new approach to low level image processing, International Journal of Computer Vision, vol. 23, no. 1, pp. 45-78, <http://www.cs.manchester.ac.uk/ugt/COMP37111/papers/smith95susan.pdf> (Zugriff 06/2012).
- [SB11] **Schilling, K., Boochs, F. (2011)**: Einsatz künstlicher Passkörper zur Registrierung von Scandaten sowie zur Fusion von Bild- und Scandaten, 31. Wissenschaftliche Jahrestagung der DGPF in Mainz, Geodaten – Eine Ressource des 21. Jahrhunderts, Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V., Band 20, 2011, S. 435-442.
- [Sch96] **Schlemmer, H. (1996)**: Grundlagen der Sensorik - Eine Instrumentenkunde für Vermessungsingenieure, Wichmann Verlag, Heidelberg.
- [Sch10] **Schneider, D. (2010)**: Integrierte Bündelblockausgleichung terrestrischer Laserscannerdaten und photogrammetrischer Bilddaten, Terrestrisches Laserscanning – TLS 2010 mit TLS-Challenge, Beiträge zum 101. DVW Seminar am 6. und 7. Dezember 2010 in Fulda, DVW Schriftenreihe Band 64/2010.

- [Sch11] **Schilling, K. (2011)**: Nutzung hybrider Messdaten, Aspekte eines räumlichen Informationssystems für die Industriearchäologie – Ergebnisse eines BMBF-Forschungsprojektes, Boochs/Przybilla (Hrsg.), Shaker Verlag, Aachen, S. 42-58.
- [Sem05] **Semmler, A. (2005)**: Das terrestrische Laserscanning als Dokumentationsmethode in Bauforschung und Denkmalpflege, Terrestrisches Laser-Scanning (TLS) – Ein geodätisches Messverfahren mit Zukunft, DVW-Schriftenreihe Band 48/2005, S. 147-167, DVW e.V. - Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Wißner-Verlag, Augsburg.
- [SH09] **Sachs, L., Hedderich, J. (2009)**: Angewandte Statistik: Methodensammlung mit R. 13., aktualisierte und erweiterte Auflage, Springer Verlag Berlin – Heidelberg.
- [SI04] **Schulz, T., Ingensand, H. (2004)**: Laserscanning – Genauigkeitsbetrachtungen und Anwendungen, Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tag 2004, Luhmann (Hrsg.), Wichmann Verlag, Heidelberg.
- [SLC⁺08] **Stamos, I., Liu, L., Chao, C., Wolberg, G., Yu, G., Zokai, S. (2008)**: Integrating automated range registration with multiview geometry for the photorealistic modeling of large-scale scenes, International Journal of Computer Vision, Special Issue on Modeling and Representation of Large-Scale 3D Scenes, vol. 78, no. 2-3, pp. 237-260, July 2008.
- [SMB00] **Schmid, C., Mohr, R., Bauckhage, C. (2000)**: Evaluation of interest point detectors, International Journal of Computer Vision, vol. 37, no. 2, pp. 151-172, <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.159.9234&rep=rep1&type=pdf&ei=rWT1T6HvJYGp4gSGubyFBw&usg=AFQjCNHXTy9AQLj1Sv4F8F-qetsEoUNX0A&cad=rja> (Zugriff 06/2012).
- [Sna10] **Snaveley, N. (2010)**: Bundler: Structure from motion (sfm) for unordered image collections, <http://phototour.cs.washington.edu/bundler/> (Zugriff 10/2012).
- [SS05] **Schäfer, T., Schulz, T. (2005)**: Kalibrierung, Einflussgrößen und Genauigkeiten von Terrestrischen Laserscannern, Terrestrisches Laser-Scanning (TLS) – Ein geodätisches Messverfahren mit Zukunft, DVW-Schriftenreihe Band 48/2005, S. 29-48, DVW e.V. - Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Wißner-Verlag, Augsburg.
- [SSS06] **Snaveley, N., Seitz, S.M., Szeliski, R. (2006)**: Photo tourism: Exploring photo collections in 3d, SIGGRAPH Conference Proceedings, ACM Press, New York, USA, pp. 835–846, http://phototour.cs.washington.edu/Photo_Tourism.pdf (Zugriff 10/2012).
- [SSS07] **Snaveley, N., Seitz, S.M., Szeliski, R. (2007)**: Modeling the world from internet photo collections, International Journal of Computer Vision (IJCV), http://phototour.cs.washington.edu/ModelingTheWorld_ijcv07.pdf (Zugriff 10/2012).
- [Stö00] **Stöcker, H. (2000)**: Taschenbuch der Physik, 4., korrigierte Auflage, Harri Deutsch Verlag, Frankfurt am Main.
- [Sta97] **Stahlberg, C. (1997)**: Eine vektorielle Darstellung des Einflusses von Ziel- und Kippachsenfehler auf die Winkelmessung, ZfV 122, Nr.5, S. 225-235.
- [Sta05] **Staiger, R. (2005)**: Terrestrisches Laserscanning – eine neue Universalmethode?, Terrestrisches Laser-Scanning (TLS) – Ein geodätisches Messverfahren mit Zukunft, DVW-Schriftenreihe Band 48/2005, S. 3-15, DVW e.V. - Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Wißner-Verlag, Augsburg.
- [SV04] **Suveg, I., Vosselman, G. (2004)**: Reconstruction of 3D building models from aerial images and maps, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 58, 2004, pp. 202-224.
- [SW06] **Staiger, R., Wunderlich, T. (2006)**: Terrestrisches Laserscanning 2006 – technische Möglichkeiten und Anwendungen, Terrestrisches Laser-Scanning (TLS 2006), DVW-Schriftenreihe Band 51/2006, S. 3-14, DVW e.V. - Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Wißner-Verlag, Augsburg.
- [SZ97] **Schmid, C., Zisserman, A. (1997)**: Automatic line matching across views, Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 666-671, <http://www.robots.ox.ac.uk/~vgg/publications/1997/Schmid97/schmid97.pdf> (Zugriff 06/2012).
- [Tip00] **Tipler, P.A. (2000)**: Physik, Gerlich/Jerke (Hrsg. der dt. Ausgabe), Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg – Berlin – Oxford.

- [TK92] **Tomasi, C., Kanade, T. (1992)**: Shape and motion from image streams under orthography: A factorization approach, *International Journal of Computer Vision*, 9 (2), pp. 137-154, http://www.eecs.berkeley.edu/~yang/courses/cs294-6/papers/TomasiC_Shape%20and%20motion%20from%20image%20streams%20under%20orthography.pdf (Zugriff 10/2012).
- [TLF10] **Tola, E., Lepetit, V., Fua, P. (2010)**: Daisy: An efficient dense descriptor applied to wide-baseline stereo, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 32, no. 5, pp. 815-830, <http://www.ele.puc-rio.br/~visao/Topicos/Tola%202010%20Efficient%20Dense%20Descriptor%20Applied%20to%20Wide%20Baseline%20Stereo.pdf> (Zugriff 10/2012).
- [Tri09] **Trimble (2009)**: Datenblatt – Trimble RealWorks Survey, http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-434411/022504-107A-D_RealWorksSurvey_TN_0409_LR.pdf (Zugriff 12/2011).
- [TZ00] **Torr, P. H. S., Zisserman, A. (2000)**: MLESAC: A new robust estimator with application to estimating image geometry, *Journal of Computer Vision and Image Understanding*, vol. 78, no. 1, pp. 138-156, <http://www.robots.ox.ac.uk:5000/~vgg/publications/papers/torr00.pdf> (Zugriff 12/2011).
- [Uhl05] **Uhl, A. (2005)**: Grundlagen Bildverarbeitung, Vorlesungsmaterialien des Studienganges Computer Science, Universität Salzburg, <http://www.cosy.sbg.ac.at/~uhl/imgProcess.pdf> (Zugriff 06/2011).
- [VGSR04] **Vosselmann, G., Gorte, B.G.H., Sithole, G., Rabbani, T. (2004)**: Recognising structure in laser scanner point clouds, *IAPRS Workshop „Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment“*, Freiburg, Germany.
- [VH92] **Vosselmann, G., Haala, N. (1992)**: Erkennung topographischer Passpunkte durch relationale Zuordnung, *ZPF - Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung*, 6/1992, <http://www.itc.nl/personal/vosselman/papers/vosselman1992.zpf.pdf> (Zugriff 12/2011).
- [Vog03] **Vogel, M. (2003)**: Vom Pixel zur Richtung - Die räumlichen Beziehungen zwischen Abbildungsstrahlen und Tachymeter-Richtungen, Dissertation, Technische Universität Darmstadt.
- [Vos02] **Vosselman, G. (2002)**: Fusion of laser scanning data, maps, and aerial photographs for building reconstruction, *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2002, <http://www.tudelft.nl/live/binaries/2faaf567-465a-48c7-b204-4944195b6b6c/doc/vosselman.igarss02.pdf> (Zugriff 10/2012).
- [VT04] **Valanis, A., Tsakiri, M. (2004)**: Automatic target identification for laser scanners, *XXth ISPRS Congress, Technical Commission V*, vol. XXXV part 5, pp. 1-6, 12-23 July, Istanbul, Turkey.
- [VW09] **Voegtli, T., Wakaluk, S. (2009)**: Effects on the measurements of the terrestrial laser scanner HDS 6000 (LEICA) caused by different object materials, *ISPRS Proceedings „Laserscanning09“*, vol. XXXVIII part 3/W8, Paris, Frankreich, 1.-2. September 2009.
- [Wen07] **Wendt, A. (2007)**: A concept for feature-based data registration by simultaneous consideration of laser scanner data and photogrammetric images, *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, vol. 62, pp. 122-134.
- [WH06] **Wendt, A., Heipke, C. (2006)**: Simultaneous orientation of brightness, range and intensity images, *ISPRS Symposium "Image Engineering and Vision Metrology"*, Dresden, Germany.
- [Wöl09] **Wölfelschneider, H. (2009)**: Physikalische Prinzipien der Laserscantechnologie, *Terrestrisches Laserscanning (TLS 2009) Yes, we Scan!*, Beiträge zum 91. DVW Seminar am 19. und 20. November in Fulda, DVW Schriftenreihe Band 60/2009.
- [WS00] **Witte, B., Schmidt, H. (2000)**: Vermessungskunde und Grundlagen der Statistik für das Bauwesen, 4., neubearbeitete Auflage, Wittwer Verlag, Stuttgart.
- [WWH09] **Wang, Z., Wu, F., Hu, Z. (2009)**: MSLD: A robust descriptor for line matching, *Pattern Recognition* 42, pp. 941-953, <http://avss2012.org/2009papers/gjkw/gk5.pdf> (Zugriff 06/2012).
- [ZB00] **Zhang, C., Baltsavias, E.P. (2000)**: Edge matching and 3D road reconstruction using knowledge-based methods, <http://e-collection.library.ethz.ch/eserv/eth:26953/eth-26953-01.pdf> (Zugriff 06/2012).
- [Zis12] **Zisserman, A. (2012)**: Matlab functions for multiple view geometry, <http://www.robots.ox.ac.uk/~vgg/hzbook/code/> (Zugriff 10/2012).

- [ZNH05] **Zhao, W., Nister, D., Hsu, S. (2005):** Alignment of continuous video onto 3D point clouds, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI), vol. 27, pp. 1305-1318.
- [Zol09] **Zoller+Fröhlich (2009):** Z+F LaserControl, http://www.zf-laser.de/Z+F_LaserControl_7.6.kompr.pdf (Zugriff 12/2011).
- [Zol11a] **Zoller+Fröhlich (2011):** Technische Daten des Laserscanners Imager 5006h, http://www.zf-laser.com/BROSCHUERE%20Z+FIMAGER_5006h_DE_10.11.10_komprimiert.pdf (Zugriff 12/2011).
- [Zol11b] **Zoller+Fröhlich (2011):** Z+F Targets, http://www.zf-laser.com/d_zubehoer_imager.html (Zugriff 12/2011).
- [Zul08] **Zuliani, M. (2008):** RANSAC for Dummies, Draft, 25. November, 2008, <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.139.2808&rep=rep1&type=pdf&ei=CZDdT7b-IaKJ4gTYwvzCCg&usg=AFQjCNFJJiH0giZhq-5km8o-eK03kDLJzA> (Zugriff 12/2008).

Anhang

A Topologie – Ebenencodierungen nach heller-dunkler-Relation

Tab. A.1: *K-Code-Lösungsmöglichkeiten bei bekannter Lage der Ebenen und heller-dunkler-Relation bei Würfelansicht 0*

HD-Code	Ebene rechts	Ebene links	Ebene mittig	K-Code
110	Gs (4)	Wg (1)	Sw (5)	0415
	Ws (2)	Gs (4)	Sw (5)	0245
	Gs (4)	Ws (2)	Sg (6)	0426
	Wg (1)	Gs (4)	Sg (6)	0146
101	Gs (4)	Sg (6)	Wg (1)	0461
	Gs (4)	Sw (5)	Ws (2)	0452
	Wg (1)	Sw (5)	Gs (4)	0154
	Ws (2)	Sg (6)	Gs (4)	0264
011	Sw (5)	Gs (4)	Wg (1)	0541
	Sg (6)	Gs (4)	Ws (2)	0642
	Sw (5)	Ws (2)	Gs (4)	0524
	Sg (6)	Wg (1)	Gs (4)	0614
001	Gw (3)	Sw (5)	Wg (1)	0351
	Sg (6)	Gw (3)	Wg (1)	0631
	Sw (5)	Gw (3)	Ws (2)	0532
	Gw (3)	Sg (6)	Ws (2)	0362
010	Sw (5)	Wg (1)	Gw (3)	0513
	Sg (6)	Ws (2)	Gw (3)	0623
	Gw (3)	Ws (2)	Sw (5)	0325
	Gw (3)	Wg (1)	Sg (6)	0316
100	Ws (2)	Sw (5)	Gw (3)	0253
	Wg (1)	Sg (6)	Gw (3)	0163
	Wg (1)	Gw (3)	Sw (5)	0135
	Ws (2)	Gw (3)	Sg (6)	0236

Tab. A.2: *K-Code-Lösungsmöglichkeiten bei bekannter Lage der Ebenen und heller-dunkler-Relation bei Würfelansicht 0 bei Verwendung des LG-Codes*

HD-Code	LG-Code			K-Code
110	014	021	035	0415
	012	024	035	0245
	014	022	036	0426
	011	024	036	0146
101	014	026	031	0461
	014	025	032	0452
	011	025	034	0154
	012	026	034	0264
011	015	024	031	0541
	016	024	032	0642
	015	022	034	0524
	016	021	034	0614
001	013	025	031	0351
	016	023	031	0631
	015	023	032	0532
	013	026	032	0362
010	015	021	033	0513
	016	022	033	0623
	013	022	035	0325
	013	021	036	0316
100	012	025	033	0253
	011	026	033	0163
	011	023	035	0135
	012	023	036	0236

Tab. A.3: *K-Code-Lösungsmöglichkeiten bei bekannter Lage der Ebenen und heller-dunkler-Relation bei Würfelansicht 1*

HD-Code	Ebene rechts	Ebene links	Ebene mittig	K-Code
110	Gs (4)	Wg (1)	Sg (6)	1416
	Ws (2)	Gs (4)	Sg (6)	1246
	Gs (4)	Ws (2)	Sw (5)	1425
	Wg (1)	Gs (4)	Sw (5)	1145
101	Gs (4)	Sg (6)	Ws (2)	1462
	Gs (4)	Sw (5)	Wg (1)	1451
	Ws (2)	Sw (5)	Gs (4)	1254
	Wg (1)	Sg (6)	Gs (4)	1164
011	Sw (5)	Gs (4)	Ws (2)	1542
	Sg (6)	Gs (4)	Wg (1)	1641
	Sw (5)	Wg (1)	Gs (4)	1514
	Sg (6)	Ws (2)	Gs (4)	1624
001	Gw (3)	Sw (5)	Ws (2)	1352
	Sg (6)	Gw (3)	Ws (2)	1632
	Sw (5)	Gw (3)	Wg (1)	1531
	Gw (3)	Sg (6)	Wg (1)	1361
010	Sw (5)	Ws (2)	Gw (3)	1523
	Sg (6)	Wg (1)	Gw (3)	1613
	Gw (3)	Ws (2)	Sg (6)	1326
	Gw (3)	Wg (1)	Sw (5)	1315
100	Wg (1)	Sw (5)	Gw (3)	1153
	Ws (2)	Sg (6)	Gw (3)	1263
	Wg (1)	Gw (3)	Sg (6)	1136
	Ws (2)	Gw (3)	Sw (5)	1235

Tab. A.4: *K-Code-Lösungsmöglichkeiten bei bekannter Lage der Ebenen und heller-dunkler-Relation bei Würfelansicht 1 bei Verwendung des LG-Codes*

HD-Code	LG-Code			K-Code
110	114	121	136	1416
	112	124	136	1246
	114	122	135	1425
	111	124	135	1145
101	114	126	132	1462
	114	125	131	1451
	112	125	134	1254
	111	126	134	1164
011	115	124	132	1542
	116	124	131	1641
	115	121	134	1514
	116	122	134	1624
001	113	125	132	1352
	116	123	132	1632
	115	123	131	1531
	113	126	131	1361
010	115	122	133	1523
	116	121	133	1613
	113	122	136	1326
	113	121	135	1315
100	111	125	133	1153
	112	126	133	1263
	111	123	136	1136
	112	123	135	1235

Tab. A.5: Mögliche LG-Codes

Ausrichtung	LG-Code			Ebenencode
	Ebene rechts	Ebene links	Ebene mittig	
0	011	021	031	1
	012	022	032	2
	013	023	033	3
	014	024	034	4
	015	025	035	5
	016	026	036	6
1	111	121	131	1
	112	122	132	2
	113	123	133	3
	114	124	134	4
	115	125	135	5
	116	126	136	6

B Helmert-Transformation

Nach [Luh03] setzt sich die Gesamtdrehung R einer räumlichen Koordinatentransformation aus den hintereinander ausgeführten Einzeldrehungen um die Koordinatenachsen zusammen. Sie lässt sich demnach mit Hilfe der Drehwinkel ω , ϕ und κ in der folgenden Weise darstellen.

$$R = R_\omega \cdot R_\phi \cdot R_\kappa \quad (\text{B.1})$$

R_κ beschreibt die Drehung um die Z-Achse, R_ϕ die Drehung um die Y-Achse und R_ω die Drehung um die X-Achse. Entsprechend der Definition im rechtshändigen Koordinatensystem verläuft die Drehrichtung entgegen dem Uhrzeigersinn beim Blick von der positiven Spitze der jeweiligen Achse zum Ursprung.

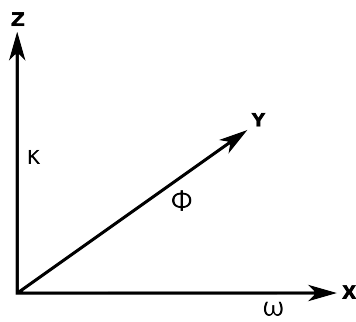


Abb. B.1: Darstellung der Rotationswinkel um die Koordinatenachsen

$$R_\omega = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{pmatrix}$$

$$R_\phi = \begin{pmatrix} \cos \phi & 0 & \sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \phi & 0 & \cos \phi \end{pmatrix}$$

$$R_\kappa = \begin{pmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Die Gesamtdrehung lässt sich schließlich ausdrücken durch:

$$R = \begin{pmatrix} \cos \phi \cdot \cos \kappa & -\cos \phi \cdot \sin \kappa & \sin \phi \\ \cos \omega \cdot \sin \kappa + \sin \omega \cdot \sin \phi \cdot \cos \kappa & \cos \omega \cdot \cos \kappa - \sin \omega \cdot \sin \phi \cdot \sin \kappa & -\sin \omega \cdot \cos \phi \\ \sin \omega \cdot \sin \kappa - \cos \omega \cdot \sin \phi \cdot \cos \kappa & \sin \omega \cdot \cos \kappa + \cos \omega \cdot \sin \phi \cdot \sin \kappa & \cos \omega \cdot \cos \phi \end{pmatrix} \quad (\text{B.2})$$

Neben der Darstellung der Rotationsmatrix mit Hilfe von Eulerwinkeln, ist deren Beschreibung durch den Einsatz von Quaternionen möglich. Basierend auf dem Einheitsquaternion

$$q = d + a \cdot i + b \cdot j + c \cdot k \quad d^2 + a^2 + b^2 + c^2 = 1 \quad (\text{B.3})$$

ergibt sich:

$$R = \begin{pmatrix} d^2 + a^2 - b^2 - c^2 & 2(ab - cd) & 2(ac + bd) \\ 2(dc + ab) & d^2 - a^2 + b^2 - c^2 & 2(bc - ad) \\ 2(ac - db) & 2(da + bc) & d^2 - a^2 - b^2 + c^2 \end{pmatrix} \quad (\text{B.4})$$

Der Einsatz von Quaternionen bietet nach [Luh10b] gewisse Vorteile: Sie erlauben zum einen eine Beschreibung der Drehwinkel durch Funktionen von vier algebraischen Parametern, zum anderen weisen sie keine singulären Stellen auf und zeigen ein schnelleres Konvergenzverhalten in Ausgleichungssystemen als Eulerwinkel, die Mehrdeutigkeiten im Wertebereich von $0 - 2\pi$ besitzen.

Aus (B.2) und (B.4) ergeben sich folgende Korrespondenzen zwischen den Quaternionen und den Euler-

winkeln:

$$\sin \phi = 2(ac + bd) \quad (\text{B.5})$$

$$\cos \phi \cos \kappa = d^2 + a^2 - b^2 - c^2 \quad (\text{B.6})$$

$$-\cos \phi \sin \kappa = 2(ab - cd) \quad (\text{B.7})$$

$$\cos \omega \cos \phi = d^2 - a^2 - b^2 + c^2 \quad (\text{B.8})$$

$$-\sin \omega \cos \phi = 2(bc - ad) \quad (\text{B.9})$$

Werden (B.6) und (B.7) sowie (B.8) und (B.9) zusammengefasst, lassen sich unter Berücksichtigung der Quadranten $\tan \omega$ und $\tan \kappa$ in der folgenden Weise bestimmen.

$$\tan \kappa = \frac{\sin \kappa}{\cos \kappa} = \frac{2(dc - ab)}{d^2 + a^2 - b^2 - c^2} \quad (\text{B.10})$$

$$\tan \omega = \frac{\sin \omega}{\cos \omega} = \frac{2(ad - bc)}{d^2 - a^2 - b^2 + c^2} \quad (\text{B.11})$$

Die Berechnung der Transformationsparameter erfolgt iterativ nach der Methode der kleinsten Quadrate. Die hierzu notwendigen Näherungswerte für die Orientierungsparameter werden nach dem in [Luh03] beschriebenen Verfahren ermittelt. Gemäß obiger Schilderungen werden Quaternionen zur Bestimmung der Rotationswinkel verwendet.

C Residuen der dunkleren Teilflächen

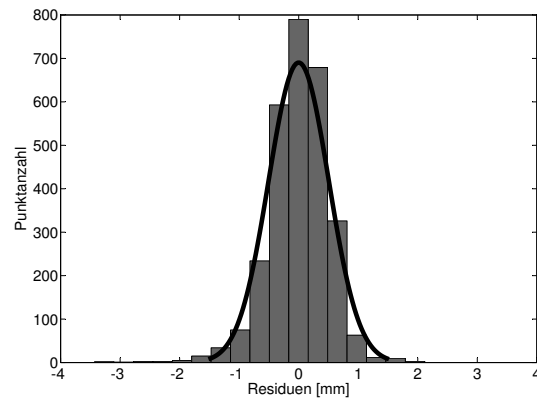


Abb. C.1: *Residuen der grauen Grundfläche der Ebene 013 (grau-weiß) mit Normalverteilung $N\{0, 0.26\}$*

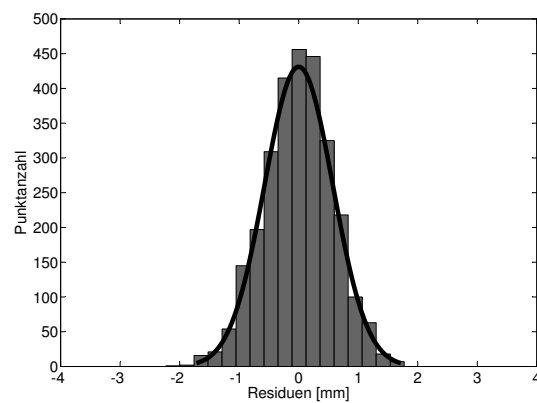


Abb. C.2: *Residuen der grauen Symbolfläche der Ebene 021 (weiß-grau) mit Normalverteilung $N\{0, 0.33\}$*

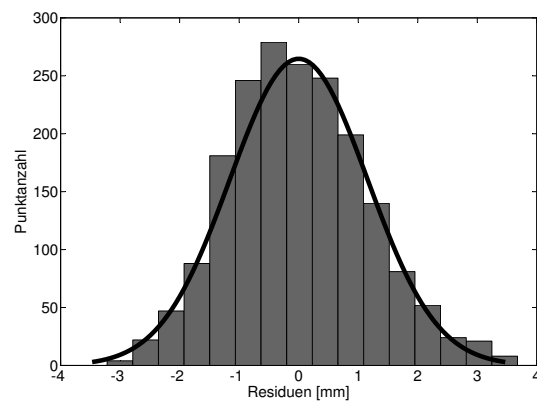


Abb. C.3: *Residuen der schwarzen Grundfläche der Ebene 036 (schwarz-grau) mit Normalverteilung $N\{0, 1.34\}$*

D Signifikanztest

Tab. D.1: Standardabweichungen der kompletten Ebenen und ihrer helleren Teilfläche

Ebene	Code	Abstand [m]	Auftreff- winkel [°]	Punktzahl Gesamtebene	s_{ges}	Punktzahl Teilfläche	s_{teil}
E ₁	2	4.4	43.1	4580	1.2	2837	0.5
E ₂	5		55.2	3113	1.5	593	0.3
E ₃	3		68.4	1801	0.8	372	0.5
E ₁	2	4.2	36.7	5030	1.1	3148	0.5
E ₂	6		56.7	3047	1.4	575	0.5
E ₃	4		77.8	1048	1.0	710	1.0
E ₁	6	6.1	48.2	1752	1.5	343	0.6
E ₂	4		45.9	2131	1.1	1341	0.7
E ₃	2		74.3	682	1.2	461	1.0
E ₁	3	3.2	56.0	5823	0.8	1037	0.4
E ₂	1		40.3	8671	0.8	5308	0.5
E ₃	6		73.6	2048	1.0	525	0.5
E ₁	6	3.6	64.0	3391	1.5	704	0.5
E ₂	2		40.1	7572	1.1	4681	0.5
E ₃	3		63.3	3772	0.8	726	0.4
E ₁	2	5.2	41.7	3097	1.1	1990	0.6
E ₂	5		54.1	2134	1.5	407	0.4
E ₃	3		71.9	1067	0.8	211	0.5
E ₁	2	5.1	35.6	3472	1.1	2121	0.5
E ₂	6		57.0	1986	1.4	387	0.5
E ₃	4		80.3	554	1.1	372	1.1
E ₁	6	6.9	50.0	1258	1.5	251	0.6
E ₂	4		43.3	1693	1.2	1065	0.8
E ₃	2		76.3	441	1.3	295	1.1
E ₁	3	3.9	65.7	2939	0.8	522	0.3
E ₂	1		29.4	6700	0.8	4154	0.5
E ₃	6		76.1	1155	0.9	312	0.5
E ₁	6	4.4	67.5	1858	1.3	394	0.4
E ₂	2		33.0	5246	1.1	3293	0.5
E ₃	3		68.3	1976	0.9	375	0.5
E ₁	2	3.1	52.8	8544	1.3	5429	0.7
E ₂	6		55.1	7126	1.5	1302	0.5
E ₃	4		59.8	5499	1.1	3417	0.7
E ₁	2	3.9	49.7	5042	1.1	3275	0.6
E ₂	6		51.9	4333	1.5	824	0.5
E ₃	4		66.8	2555	1.0	1580	0.6

Tab. D.2: Prüfgrößen für den *t*-Test

Code	α [°]	pkt_{ges}	pkt_{teil}	$n_{x_{ges}}$	$n_{x_{teil}}$	$n_{y_{ges}}$	$n_{y_{teil}}$	$n_{z_{ges}}$	$n_{y_{teil}}$	d_{ges}	d_{teil}	t_x	t_y	t_z	t_d
2	43.1	4580	2837	-0.0303	-0.0316	0.9995	0.9995	-0.0107	-0.0097	-0.0270	-0.0271	116	85	80	482
5	55.2	3113	593	-0.9997	-0.9992	-0.0207	-0.0381	0.0124	0.0115	0.0340	0.0341	399	386	21	88
3	68.4	1801	372	0.0040	-0.0032	0.0139	-0.0014	0.9999	1.0000	0.0418	0.0416	121	255	175	55
2	36.7	5030	3148	0.0895	0.0898	0.9960	0.9960	-0.0023	-0.0019	-0.0233	-0.0236	31	30	49	956
6	56.7	3047	575	0.9946	0.9965	-0.1039	-0.0835	0.0005	-0.0050	-0.0328	-0.0325	399	417	118	150
4	77.8	1048	710	-0.0003	-0.0032	0.0028	-0.0012	1.0000	1.0000	0.0449	0.0448	54	72	13	35
6	48.2	1752	343	0.4447	0.4376	-0.8957	-0.8991	0.0049	0.0050	0.0296	0.0298	84	84	1	32
4	45.9	2131	1341	-0.8954	-0.8947	-0.4452	-0.4466	0.0041	0.0054	0.0279	0.0279	59	59	51	22
2	74.3	682	461	0.0066	0.0013	-0.0001	-0.0084	1.0000	1.0000	0.0434	0.0432	53	84	20	42
3	56.0	5823	1037	0.9099	0.9108	-0.4147	-0.4127	0.0099	0.0072	0.0319	0.0321	136	133	169	232
1	40.3	8671	5308	-0.4098	-0.4110	-0.9122	-0.9115	-0.0065	-0.0130	0.0244	0.0245	298	336	1469	475
6	73.6	2048	525	-0.0028	-0.0054	0.0102	-0.0121	0.9999	0.9999	0.0458	0.0454	50	427	52	157
6	64.0	3391	704	0.7245	0.7065	-0.6889	-0.7077	-0.0208	-0.0034	0.0374	0.0376	585	590	418	85
2	40.1	7572	4681	0.7051	0.7053	0.7091	0.7089	-0.0100	-0.0062	-0.0250	-0.0251	46	37	585	620
3	63.3	3772	726	0.0144	0.0078	-0.0008	-0.0054	0.9999	1.0000	0.0399	0.0400	240	171	185	86
2	41.7	3097	1990	-0.9815	-0.9814	-0.1911	-0.1915	-0.0092	-0.0107	-0.0262	-0.0263	30	25	91	411
5	54.1	2134	407	-0.1881	-0.2005	0.9821	0.9797	-0.0094	-0.0034	-0.0329	-0.0330	186	187	97	49
3	71.9	1067	211	-0.0082	0.0041	-0.0012	-0.0083	1.0000	1.0000	0.0418	0.0416	113	66	9	33
2	35.6	3472	2121	0.9974	0.9974	0.0716	0.0727	0.0045	0.0017	0.0217	0.0219	67	75	194	461
6	57.0	1986	387	-0.0639	-0.0739	0.9980	0.9972	-0.0015	-0.0064	-0.0326	-0.0323	133	139	70	67
4	80.3	554	372	-0.0094	-0.0064	-0.0021	-0.0057	1.0000	1.0000	0.0468	0.0468	25	31	9	16
6	50.0	1258	251	0.8128	0.8152	0.5825	0.5791	0.0001	0.0056	0.0298	0.0299	31	31	43	15
4	43.3	1693	1065	0.5852	0.5833	-0.8109	-0.8123	0.0040	0.0046	0.0258	0.0259	68	68	17	57
2	76.3	441	295	-0.0013	0.0078	0.0083	0.0057	1.0000	1.0000	0.0445	0.0443	53	15	8	26

E Berechnungsbeispiele zur Kontrolle der Würfelgeometrie

Tab. E.1: Gegenüberstellung unterschiedlicher Auflösungsstufen bei 7m, 10m und 12m

Würfelcode	Ebene	Auftreff- winkel [°]	Punkt- anzahl		s ₀ [mm]		L _m [mm]		L _{max} [mm]	
513 (7m)	ru	74	411	107*	0.4	0.4*	1.1	2.5*	2.2	4.9*
	lu	19	3504	858*	0.5	0.6*				
	mo	79	283	79*	0.4	0.8*				
513 (7m)	ru	53	832	204*	0.4	0.4*	1.3	2.0*	2.7	3.9*
	lu	39	2487	637*	0.5	0.5*				
	mo	77	284	76*	0.4	0.8*				
513 (10m)	ru	51	435	110*	0.5	0.6*	1.2	1.4*	2.5	3.1*
	lu	40	2042	503*	0.7	0.6*				
	mo	83	108	64*	0.5	1.1*				
415 (12m)	ru	73	490	138*	1.0	1.2*	3.1	3.8*	5.9	6.1*
	lu	22	1279	296*	0.8	0.8*				
	mo	86	97	33*	0.9	1.3*				
415 (12m)	ru	49	1134	274*	1.0	1.2*	2.0	2.9*	4.1	5.2*
	lu	42	1421	348*	0.7	0.8*				
	mo	86	105	37*	0.9	1.5*				

Danksagung

Diese Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Raumbezogene Informations- und Messtechnik der Fachhochschule Mainz (i3mainz).

Ich möchte mich an dieser Stelle bei einigen Personen bedanken, die mich während dieser Zeit unterstützt haben.

Ein besonders großer Dank geht an meinen Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Carl Gerstenecker für die vielen Anregungen und Ratschläge sowie seine immerwährende Diskussionsbereitschaft und Motivation. Herrn Prof. Dr.-Ing. Frank Boochs danke ich für die Betreuung der Arbeit, die fachlichen Diskussionen und die Erstellung des Zweitgutachtens. Herrn Prof. Dr.-Ing. Andreas Eichhorn danke ich für die Korrektur der Arbeit.

Zu guter Letzt geht mein Dank an meine ehemaligen Kolleginnen und Kollegen am i3mainz für eine angenehme Zeit am Institut und die Unterstützung bei Messungen sowie Hilfestellungen bei technischen Problemen.

Lebenslauf

Der Lebenslauf ist in der Online-Version aus Gründen des Datenschutzes nicht enthalten